

BEST AVAILABLE COPY

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公表特許公報 (A)

(11)特許出願公表番号

特表2002-540450

(P2002-540450A)

(43)公表日 平成14年11月26日(2002.11.26)

(51) Int.Cl.⁷
 G 0 2 F 1/065
 G 0 2 B 6/12
 G 0 2 F 1/313

識別記号

F I
 G 0 2 F 1/065
 1/313
 G 0 2 B 6/12

テマコード(参考)
 2 H 0 4 7
 2 H 0 7 9
 H 2 K 0 0 2

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 58 頁)

(21)出願番号 特願2000-607037(P2000-607037)
 (86) (22)出願日 平成12年3月22日(2000.3.22)
 (85)翻訳文提出日 平成13年9月25日(2001.9.25)
 (86)国際出願番号 PCT/US00/07630
 (87)国際公開番号 WO00/57221
 (87)国際公開日 平成12年9月28日(2000.9.28)
 (31)優先権主張番号 09/274,271
 (32)優先日 平成11年3月22日(1999.3.22)
 (33)優先権主張国 米国(US)

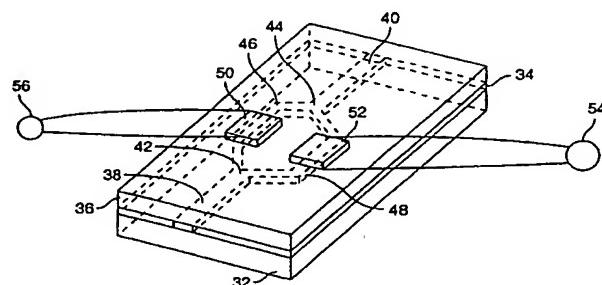
(71)出願人 ジェムファイア・コーポレーション
 アメリカ合衆国・94303・カリフォルニア
 州・パロ アルト・ナンバー 600・イー
 スト ベイショア ロード・2471
 (72)発明者 ラクリッツ, ヒラリー・エス
 アメリカ合衆国・95014・カリフォルニア
 州・キュベルチノ・パランカ ドライブ・
 10952
 (72)発明者 コワルツイック, トニー・シイ
 アメリカ合衆国・94306・カリフォルニア
 州・パロ アルト・アシュ ストリート・
 1850
 (74)代理人 弁理士 山川 政樹

最終頁に続く

(54)【発明の名称】光電子および光子デバイス

(57)【要約】

光電子および光子デバイス(100)は、公称動作温度より低いガラス転移温度(T_g)を有するポリマー材料を使用して形成されている。このような材料を使用することによって局所的または部分的な運動性が高まり、そのためポリマー材料の局所応力がなくなるか、または最小限に抑えられ、性能がより強靭になる。本発明は、架橋間のポリマー部分が局所的に自由な動きが可能である一方、材料の大規模な動きはポリマー材料の架橋構造によって制約されることができる T_g より上の領域にある動作温度範囲で、光デバイス(100)内でポリマーを使用することを含む。したがって、本発明により構成されるデバイスの温度動作点は、 T_g 付近の粘弾性領域からも T_g より下のガラス状領域からも離れていることが好ましい。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 熱的にサイクルされる熱光学機器であって、

ポリマーが前記ポリマーの最低動作温度を超えないガラス転移温度を光路沿いに有し、そのためポリマー鎖が高い局所運動性を保持できるような方法で構成要素が機能するポリマーを含む熱光学機器。

【請求項 2】 重要な期間中の温度変化に応答して屈折率の変化に制御可能で作用するための構成要素の光伝送領域に熱的に結合された熱励振要素をさらに含む請求項 1 に記載の機器。

【請求項 3】 前記励振要素がパターン付き抵抗性層である請求項 2 に記載の機器。

【請求項 4】 デフレクタとして形成された請求項 2 に記載の機器。

【請求項 5】 前記デフレクタが全内部反射スイッチである請求項 4 に記載の機器。

【請求項 6】 所望の屈折率に調節可能な制御器として形成された請求項 2 に記載の機器。

【請求項 7】 前記制御器が回折格子である請求項 6 に記載の機器。

【請求項 8】 前記ガラス転移温度が前記ポリマーの最低動作温度より少な
くとも 20℃下である請求項 1 に記載の機器。

【請求項 9】 最低動作温度を維持するための加熱要素をさらに含む請求項 1 に記載の機器。

【請求項 10】 公称動作温度を調節するための冷却要素をさらに含む請求項 1 に記載の機器。

【請求項 11】 前記光路が光ウェーブガイド部分である請求項 1 に記載の機器。

【請求項 12】 前記ポリマーが架橋ポリマーである請求項 1 に記載の機器

。

【請求項 13】 前記ポリマーが前記ポリマーの最低動作温度を超えない有効ガラス転移温度を光路沿いに有し、そのためポリマー鎖が高い局所運動性を保持できるような方法で構成要素が機能する請求項 1 に記載の機器。

【請求項14】 前記ポリマーが基板上に少なくとも1層を具備する請求項1に記載の機器。

【請求項15】 ガラス転移温度と粘弾性効果が発現する温度依存性の励振閾値とを有する光透過性ポリマーの少なくとも1つの要素と、

前記ポリマー要素を始動するために前記ポリマー要素に隣接して配設された熱励振器と、

公称動作温度を設計温度前後の範囲に調節し、それによって前記ガラス転移温度より上の温度で粘弾性効果を利用するため、前記動作温度が前記ガラス転移温度より上に維持される温度制御システムとを具備する光デバイス。

【請求項16】 前記熱励振器が光要素の屈折率を変化させるように働く請求項15に記載の光デバイス。

【請求項17】 前記屈折率の変化が周期的である請求項16に記載の光デバイス。

【請求項18】 前記ポリマー要素に光学的に結合された光ウェーブガイドをさらに含む請求項15に記載の光デバイス。

【請求項19】 前記熱励振器の一部を形成する電極をさらに含む請求項15に記載の光デバイス。

【請求項20】 前記ポリマー要素が、前記熱励振器に応答して伝送状態を変化させる光スイッチとして光路内に配設される請求項15に記載の光デバイス。

【請求項21】 前記光スイッチが全内部反射スイッチである請求項20に記載の光デバイス。

【請求項22】 前記ポリマー要素が、所望の屈折率に調節可能な制御器として光路内に配設される請求項15に記載の光デバイス。

【請求項23】 前記制御器が前記熱励振器に応答して回転可能な光回折格子である請求項22に記載の光デバイス。

【請求項24】 前記ガラス転移温度がポリマー公称動作温度よりも少なくとも20°C下である請求項15に記載の光デバイス。

【請求項25】 公称動作温度を調整するための冷却要素をさらに含む請求

項15に記載の光デバイス。

【請求項26】 励振閾値が前記ポリマー内の屈折率の緩やかな変化の閾値であって、前記屈折率の緩やかな変化が前記熱励振器によって加えられた熱励振の変化率より低い変化率を有する請求項15に記載の光デバイス。

【請求項27】 前記ポリマーが架橋ポリマーである請求項15に記載の光デバイス。

【請求項28】 励振閾値が前記架橋ポリマー内の屈折率の緩やかな変化の閾値であって、かつ前記温度制御システムが前記公称動作温度を維持するように働き、そのため単位面積あたりの熱パルス・エネルギーに関する閾値が前記熱励振器によって加えられた単位あたりの熱パルス・エネルギーよりも実質的に大きくなるような請求項27に記載の光デバイス。

【請求項29】 励振閾値が前記架橋ポリマー内の屈折率の緩やかな変化の閾値であって、かつ前記温度制御システムが前記公称動作温度を維持するように働き、そのため 単位面積あたりの熱パワーに関する閾値が前記熱励振器によって加えられた単位あたりの熱パワーよりも実質的に大きくなるような請求項27に記載の光デバイス。

【請求項30】 前記ポリマーが有効ガラス転移温度を有し、かつ前記温度制御システムが公称動作温度を前記設計温度前後の範囲に調節し、それによって前記有効ガラス転移温度より上の温度で粘弾性効果を利用するため、前記動作温度が前記有効ガラス転移温度より上に維持される請求項15に記載の光デバイス。

【請求項31】 前記光デバイスの公称動作温度より下のガラス転移温度によって特徴付けられる光透過性ポリマー要素の少なくとも1層と、

前記ポリマー要素を含むように配設された光ウェーブガイドと、

前記ポリマーの少なくとも1つの特性を前記公称動作温度で利用するために前記動作温度が前記ガラス転移温度より上で維持されるように動作温度を調節するための温度制御システムとを具備する光デバイス。

【請求項32】 前記特性が温度に伴う屈折率の変化率である請求項31に記載の光デバイス。

【請求項 3 3】 前記特性が、前記ポリマー要素を励振するために要するパワー要件の減少である請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 3 4】 前記特性が、前記ポリマー要素を励振するために要する熱エネルギー要件の減少である請求項 3 3 に記載の光デバイス。

【請求項 3 5】 前記特性が、予測される応答を最小限のゆがみで再現する忠実度であって、前記予測される応答が時間に対する屈折率の変化率の形態である請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 3 6】 前記特性が、予測される信号に関する出力信号の追加周波数成分が最小限で発生することであって、前記出力信号が時間に対する屈折率の変化率である請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 3 7】 前記特性が前記要素の光挿入損失の減少である請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 3 8】 前記特性が熱サイクルの公差を含む寿命の増加である請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 3 9】 前記特性が製作に伴う残留応力の低下である請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 4 0】 前記特性が複屈折の低下である請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 4 1】 前記特性が温度の関数として本質的に一定な屈折率の変化率である請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 4 2】 前記デバイスが光学回折格子である請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 4 3】 前記特性が、温度に対する前記回折格子の共鳴波長の線形関係である請求項 4 2 に記載の光デバイス。

【請求項 4 4】 光スイッチとして形成される請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 4 5】 前記要素の屈折率の変化を熱的に励振するためのアプリケータ電極をさらに含む請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 4 6】 前記ポリマーが架橋ポリマーである請求項 3 1 に記載の光

デバイス。

【請求項 4 7】 前記特性が前記要素の長期的な物理的変形（クリープ）の減少である請求項 4 6 に記載の光デバイス。

【請求項 4 8】 前記特性が熱サイクルに伴う残留応力の低下である請求項 4 6 に記載の光デバイス。

【請求項 4 9】 前記ポリマーがポリアクリレートである請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 5 0】 前記ポリマーがポリアクリレートである請求項 1 5 に記載の光デバイス。

【請求項 5 1】 前記ポリマーがポリアクリレートである請求項 1 に記載の光デバイス。

【請求項 5 2】 前記ポリマーがポリウレタンである請求項 3 1 に記載の光デバイス。

【請求項 5 3】 前記ポリマーがポリウレタンである請求項 1 5 に記載の光デバイス。

【請求項 5 4】 前記ポリマーがポリウレタンである請求項 1 に記載の光デバイス。

【請求項 5 5】 基板と、
基板上に配設された、出力を有するウェーブガイドと、
前記ウェーブガイドと光学的に結合するために前記ウェーブガイドの出力近くで基板上に配設され、光伝送性であり、かつ選択されたガラス転移温度を有するポリマー要素と、

前記ポリマー要素の動作温度を前記選択されたガラス転移温度より上に維持するため前記ポリマー要素に熱的に結合された加熱要素とを具備する集積光スイッチ。

【請求項 5 6】 前記加熱要素が、さらに過渡熱エネルギーを前記ポリマー要素に提供して、前記ポリマー要素の光学特性を変え、かつ前記集積光スイッチを始動するように構成される請求項 5 5 に記載の集積光スイッチ。

【請求項 5 7】 過渡熱エネルギーを前記ポリマー要素に提供して、前記ポ

リマー要素の光学特性を変え、かつ前記集積光スイッチを始動するように前記ポリマー要素に熱的に結合された第2加熱要素をさらに具備する請求項55に記載の集積光スイッチ。

【請求項58】 光デバイスの入力に結合された、伝送軸を有する入力ウェーブガイドと、

前記入力ウェーブガイドに光学的に結合され、前記入力ウェーブガイドの伝送軸に伴う分離の第1角を形成し、選択されたガラス転移温度を有するポリマー材料の部分を含む第1出力ウェーブガイドと、

前記入力ウェーブガイドに光学的に結合され、前記入力ウェーブガイドの伝送軸に伴う分離の第2角を形成し、そのため前記入力ウェーブガイドによって伝送された光が第1出力ウェーブガイドと第2出力ウェーブガイドとの間で分割されることが可能な第2出力ウェーブガイドと、

少なくとも第1出力ウェーブガイドに熱的に結合され、ポリマー材料の動作温度を選択されたガラス転移温度より上に維持するためのヒーターとを具備する光デバイス。

【請求項59】 第2出力ウェーブガイドが、第2の選択されたガラス転移温度を有するポリマー材料の第2部分を含み、第2出力ウェーブガイドに熱的に結合された第2ヒーターをさらに具備する請求項58に記載の光デバイス。

【請求項60】 前記分離の第1角が0度であり、前記第1出力ウェーブガイドが前記入力ウェーブガイドの延長である請求項58に記載の光デバイス。

【請求項61】 主ウェーブガイドを形成する第1光学材料のコアと、

前記コアに隣接して配設され、前記コアより低い屈折率を有する、少なくとも1つの第2光学材料の被覆層と、

ガラス転移温度を有する光透過性架橋ポリマーである、少なくとも1つの前記第1および第2光学材料と、

前記被覆層上に配設され、電極の端縁が前記ウェーブガイドに対して斜角となるよう前記主ウェーブガイドを橋渡しするパターン付き抵抗性主加熱要素であって、前記電極は活性化すると前記ポリマーの屈折率の変化に作用して前記主ウェーブガイドから光エネルギーの向きを変えるためのものであり、前記要素は制

御用励振器に結合可能であり、前記光スイッチは前記ガラス転移温度より上の温度の環境で動作するためのものであるパターン付き抵抗性主加熱要素とを含む全内部反射（TIR）光スイッチ。

【請求項 6 2】 前記環境を前記第 1 および第 2 ガラス転移温度より上の温度に維持するための第 2 加熱要素をさらに含む請求項 6 1 に記載の TIR 光スイッチ。

【請求項 6 3】 前記主加熱要素が、前記環境を前記第 1 および第 2 ガラス転移温度より上の温度に維持するように付加的に働く請求項 6 1 に記載の TIR 光スイッチ。

【請求項 6 4】 ガラス転移温度と粘弾性効果が発現する温度依存性の閾値とによって特徴付けられる光透過性ポリマー材料で製作される光学構造を具備する光デバイスを動作する方法であって、

動作温度をガラス転移温度より上に維持するステップと、
光エネルギーを前記ポリマー要素内へ導くステップとを含み、
一方、前記光エネルギーの輸送を選択的に制御するために前記ポリマー要素に熱エネルギーを選択的に加えるステップを含む方法。

【請求項 6 5】 前記選択的に加えるステップが、
制御された変化率で屈折率の局所的な変化に作用するために、前記ポリマーの選択された領域に熱エネルギーのインパルスを選択的に加えるステップを含む請求項 6 4 に記載の方法。

【請求項 6 6】 前記屈折率を実質的に逆転させるステップと、その後に制御された変化率で屈折率の変化に再作用するために、前記ポリマー要素に熱エネルギーを選択的に加えるその後のステップをさらに含む請求項 6 5 に記載の方法。

【請求項 6 7】 前記熱エネルギーを加えた後に、前記ポリマー要素から積極的に熱を奪うステップをさらに含む請求項 6 6 に記載の方法。

【請求項 6 8】 ポリマー材料を使用する方法であって、
ポリマーの特徴的なガラス転移温度より上に最低動作温度を確立するステップと、

その後に、電磁エネルギーの輸送を制御するために電磁エネルギーをポリマーに導いてポリマーの屈折率の変化に作用しながら、前記最低動作温度より上にポリマーを熱で過渡的に励振するステップとを含む方法。

【請求項69】 第1ガラス転移温度と、第2ガラス転移温度を有する光透過性架橋ポリマーの少なくとも1つの被覆層と、前記ポリマーの屈折率の変化に作用するための、励振器に結合されたアプリケータ電極とを有した光透過性架橋ポリマーのコアを有する、前記第2ガラス転移温度より上の温度の環境で動作させるための光スイッチを動作する方法であって、

動作温度をガラス転移温度より上に維持するステップと、

一方、光エネルギーを前記コアに導くステップと、

一方、前記光エネルギーの向きを選択的に変えるため、前記領域の屈折率が変化するように前記アプリケータ電極を介して前記コアの領域に熱エネルギーを選択的に加えるステップを含む方法。

【請求項70】 第1ガラス転移温度と、第2ガラス転移温度を有する光透過性架橋ポリマーの少なくとも1つの被覆層と、前記ポリマーの屈折率の変化に作用するための、励振器に結合可能なアプリケータ電極とを有した光透過性架橋ポリマーのコアを有する、前記第1および第2ガラス転移温度より上の温度の環境で動作させるための光スイッチを動作する方法であって、動作温度をガラス転移温度より上に維持するステップと、

一方、光エネルギーを前記コアに導くステップと、

一方、前記光エネルギーの向きを選択的に変えるため、前記領域の屈折率が変化するように前記アプリケータ電極を介して前記コアの領域に熱エネルギーを選択的に加えるステップを含む方法。

【発明の詳細な説明】**【0001】****(発明の背景)**

本発明は、光または光子構成部品に関し、さらに具体的には、ポリマーで形成した光電子デバイスに関する。

【0002】

集積光デバイス（すなわち、ウェーブガイド、スイッチ、相互接続など）は周知であり、そのデバイスの動作温度範囲よりもはるかに高いガラス転移温度（ T_g ）を有するポリマー材料で構成される。ガラス転移温度は、それを越えるとポリマーの主鎖の著しい局所運動が発生する温度の一範囲である。 T_g は通常、約10主鎖単位の協同運動、または 10^{14} ポアズの粘度、または熱容量の2次位相転移と定義される。温度による体積の変化率において勾配が変化を起こす温度が、ガラス転移温度（ T_g ）または軟化点であるとみなされる。図1および2に示す粘弾性および特性の詳細な説明は、G. B. McKenna著「Comprehensive Polymer Science」、第2巻、C. BoothおよびC. Price編、Permagon Press、オックスフォード（1989年）の第10章を参照されたい。

【0003】

架橋材料は、架橋間の分子量が主鎖単位の協同運動を可能にするほど大きいときにガラス転移を顕現する。したがって、架橋の緩い材料はガラス転移を示す一方、高度な架橋材料は示さないことがある。

【0004】

T_g より下では部分的な運動の量が制限されるため、ポリマー材料は平衡に達することができない。熱力学（エントロピー的）効果はなおも平衡に向けて変化を押し進めるが、温度が T_g を大きく下回っている場合はこれらの変化が非常に緩やかな比率で起こるため、実験では、重要な時間スケール（この場合は観察の時間スケール）の間には発現しない。

【0005】

過去に高い T_g を有する材料が選ばれてきた理由は、電子加工およびパッケー

ジングとの適合性と、材料内に組み込まれた発色団の向きの維持と、環境に強いことおよび性能安定性とを含めていくつかある。高 T_g 材料（パッケージされたデバイス内の材料の動作温度より高い T_g を有する材料）を使用すると、ポリマー部分の局所運動が著しく制約される領域でのデバイス動作が確実になり、材料がガラス状態で確実に動作する。光電子デバイス用ポリマー被膜の初期の開発では、高 T_g 材料の使用が要件であることを前提にしていた。「たとえば、最初の研究の EO ポリマーの多くは、ゲストホストか側鎖かを問わず、熱可塑性アクリレート化学を基礎とし、100から150°C のガラス転移温度を呈した。この低い T_g によって、ポリマー鎖の拡散率が高くなり、周辺温度で5年間にわたって動作させた極状態の光学特性が少なくとも 10% 変動する。この速い変化は、 T_g 付近で動作するガラス状ポリマーが物理的な老化と緩和を受けて、応力を低下させ、自由体積を最小限にするような動的課程の自然な成り行きである。より高い動作温度を考慮すると（125°C）、光特性の安定性はさらに悪化する。」

（R. Lytel 他による記事「Polymers for Lightwave and Integrated Optics」、L. A. Hornak 編、Marcel Dekker、1992年のpp. 460からの抜粋）

【0006】

集積光電子機器用に開発されたガラス転移のより高い材料は、Hoechst、DuPont、Amocoなどによって開発されたポリイミド材料（約 250°C から 350°C を優に越える範囲のガラス転移）、および日立化成工業によって開発されたポリキノリン（250°C より高い T_g ）を含む。研究者は次の仮定を指針にした。すなわち「このようなウェーブガイドでの第一優先は、高性能電子デバイスの製作との適合性が得られる高い熱安定性にすべきである。弗化ポリイミドは 335°C より上の高ガラス転移温度を有し、はんだ付けを含む IC 製作工程の温度（270°C 以下）に対して熱的に安定である。」（T. Matsuur a 他の「Elect. Lett. 29」、2107～2108（1993年））

【0007】

熱光学スイッチに使用されるポリマーの要件は、R. Moosburger 他によって報告されている（「Proc. 21st Eur. Conf. On O

p t. Comm.」(ECOC'95ブリュッセル)、p. 1063~1066)。「波長1.3μmでの低損失スイッチが、市販の高温安定($T_g > 350^{\circ}\text{C}$)ポリマーCYCLOTENE(商標)で作成された。(中略) CYCLOTENE(商標)は、固有の光学損失が低いこと、 350°C を越えての熱安定性、低い水分吸収、および優れた平坦化特性により選択された。」

【0008】

ポリマー受動光相互接続用ポリマーの要件は、DuPontより同社Polyguide(商標)材料システムについてR. T. Chen他のSPIE第3005巻(1997年)、p. 238~251内で報告されている。「 T_g が高く、熱膨張計数(CTE)の低いポリマーは、Polyguide(商標)のパッケージ化された構造特性を一貫支配することによって、熱機械的および環境的な強さおよび性能安定性を提供する。」DuPontは、米国特許第5,292,620号および第5,098,804号に記載されているセルロースアセテートブチレート(CAB)材料を使用している。

【0009】

上述のアクリレート、ポリイミド、ポリキノリン、ベンゾシクロブテンおよびCAB材料システムに加え、集積光デバイスの作製に使用されているその他の材料システムは、CARDOポリマー(C. Wu他の「Polymer for Second-Order Nonlinear Optics」内、ACS Symposium Series 601、1995年のpp. 356~367)、エポキシ複合体(C. Olsen他「IEEE Phot. Tech. Lett. 4」、1992年のpp. 145~148)、ポリアルキルシリコンおよびポリシリコン(T. Weidman他の「Polymers for Lightwave and Integrated Optics, Op. Cit.」内、1992年のpp. 195~205)、ポリカーボネートおよびポリスチレン(T. Kainoの「Polymers for Lightwave and Integrated Optics, Op. Cit.」内、1992年のpp. 1~38)、ポリエステル(A. Nahata他の「Appl. Phys. Lett. 64」、3371、1994年)、ポリシロキサン(M. Usui

他の「J. Lightwave Technol. 14」、2338、1996年)、およびシリコーン(T. Watanabe他の「J. Lightwave Technol. 16」、1049~1055、1998年)を含む。ポリメチルメタクリレート、ポリスチレン、およびポリカーボネートはまた、ポリマー光ファイバー(POF)に使用されている。ポリカーボネートはコンパクト・ディスク用基板として使用され、プラスチック製めがね用レンズ、硬質コンタクト・レンズ、および関連用途に使用されている。シリコーンは、可撓性コンタクト・レンズに使用されている。

【0010】

何人かの研究者は、ポリマーの熱効果を使用して光スイッチング・デバイスを設計した。R. Moosburgerの研究成果の「Op. Cit.」に加え、一群がデジタル光ウェーブガイド・スイッチ構成を使用して熱光学スイッチを商品化しようとした(G. R. Mohlmann他のSPIE第1560巻「Nonlinear Optical Properties of Organic Materials IV」、1991年のpp. 426~433)。この成果では、抵抗性の加熱要素が、ウェーブガイドY分岐スプリッタを含んだ高ガラス転移温度の熱光学ポリマー上に堆積されている。熱電極を活性化すると、活性化された電極下で屈折率が低下し、活性化されていないウェーブガイド分岐内に光が切り替わる。

【0011】

本発明が導き出された熱光学集積光デバイス用ポリマーを使った作業では、材料の粘弾性挙動による非線形応答があることが観察された。たとえば、熱光学デバイスを繰り返し切り替えた後では、ポリマーは加熱されたところの屈折率に局所的な変化を呈し始め、スイッチの「オフ」状態とその時間応答性を擾乱する。ポリマーの粘弾性特性は、加えられた熱またはその他の擾動に対する材料応答の機械特性を決定する。これらの特性は、加えられた変化(熱、応力、音響励振など)によって材料特性(屈折率の漸変、機械的ひずみなど)に時間依存性のある応答が発生する比率を支配する。真に弾性な誘因は一般に線形であり、加えられた変化を取り除くと消える。しかし、材料応答の時間依存性のある要素は、加え

られた変化を除去した後も材料内に保持され、元に戻るには数分から数十億年を要することもある。材料応答がデバイスの動作特性の劣化を引き起こす場合は、その劣化が時間を経て蓄積し、デバイスが性能仕様を満たせなくなる。

【0012】

通信で使用される光デバイスでは、挿入損失、クロストーク耐性、およびシステムのビット・エラー率にとって重要なその他の性能尺度が劣化することがあるため、このような挙動は望ましくない。時間で変化するこのような要因は、信頼性および再現性が不可欠でありながら、耐用寿命の間に広範な環境条件に遭遇する可能性のある遠隔通信用途にとって問題である。効果的な熱光学スイッチング・デバイスを可能にするためには、材料が光学特性のこのような緩やかな変化を呈すべきではない。

【0013】

(発明の概要)

本発明によれば、光電子および光子デバイスが、公称動作温度より低いガラス転移温度 (T_g) を有するポリマー材料を使用して形成される。このような材料を使用することによって、局所的または部分的な運動性が高まり、そのためポリマー材料にかかる局所応力がなくされ、またはそれが最小限に抑えられて、性能がさらに強化される。

【0014】

本発明は、 T_g より上の領域の動作温度範囲、すなわち架橋間のポリマー部分が局所的に自由な動きが可能である一方、材料の大規模な動きはポリマー材料の架橋構造によって制約することができる領域でポリマーを光デバイスに使用することを含む。したがって、本発明により構成されるデバイスの温度動作点は、 T_g 付近の粘弾性領域からも T_g より下のガラス状領域からも離れていて、そのためデバイスが、粘弾性効果が材料システムに大きく影響せず、かつポリマーの時間依存性のある応答が最小限に抑えられ、またはそれがない領域で動作することが望ましい。したがってデバイスの動作は、最小限の劣化を達成でき、改善された性能属性を示すことができる。

【0015】

本発明は、添付の図面と共に下記の詳しい説明を参照すれば、よりよく理解できよう。

【0016】

(特定の実施形態の説明)

図1は、一般にアモルファス・ポリマー材料について、温度の関数としての体積の変化を概略的に示す。範囲Aはガラス状の範囲であり、範囲Bはゴム状（架橋材料の場合）または溶融（非架橋ポリマー）レジームであり、範囲Aと範囲Bとの間の範囲Cは粘弾性レジームである。

【0017】

本発明によれば、体積温度曲線内のガラス転移温度より上の領域（図1の領域B）が使用される。この領域では、ポリマー部分が局所的に自由な動きが可能である。その結果、繰り返し動作では、デバイスは早期故障／性能の劣化の誘因となる粘弾性効果が最小限またはごくわずかで機能できる。好ましい実施形態では、大規模（バルク）な動きがポリマー材料の架橋構造によって制約される。

【0018】

ガラス転移温度（ T_g ）より上の領域で動作させることの動機は、粘弾性レジーム（上述）で動作させることに伴って誘発される挿入損失などの負の効果を回避することである。しかしながら、集積光学機器などの用途では、スイッチングおよびその他の機能を実施するために局所加熱を微細領域に適用しなければならないことが多い。材料の加熱は、正味の温度上昇が T_g を越えない場合でさえも、屈折率などの材料特性に長期持続性の変化を引き起こすことがわかっている。これらの変化は、たとえば光スイッチなどで多数のサイクルの熱パルスを加えた後にきわめて顕著になる。加熱が局所化されると屈折率の変化が局所化し、デバイス内の挿入損失の増加などの望ましくない光学効果が発生する。

【0019】

本発明によれば、これまで周知のものよりも物理特性が質的に異なる新しい部類の光デバイスであって、 T_g と所期の動作温度の範囲との関係で特徴付けられるポリマー光学材料が使用され、特にその動作温度が光学材料の T_g 付近またはそれより上の光デバイスが開示されている。デバイスをその光学材料の T_g 付近

またはそれより上で動作させることによって、粘弾性誘因を減少させること、または除去することさえもできる。動作温度が T_g 付近（丁度またはわずかに下）の場合は、粘弾性問題が小さくなる可能性があり、動作温度が T_g より上の場合は、粘弾性誘因による劣化効果の蓄積はないはずである。この新種のデバイスはまた、性能の改善を示すことができ、広範な動作を可能とする。

【0020】

ガラス転移温度 T_g を測定し、かつ温度の関数として T_g に関連する材料特性を測定する実験では、測定中の温度の変化率が結果を変化させることが観察された。図2に示すように、緩やかな温度上昇で測定した T_g （比率2）は、急速な上昇で測定した T_g （比率1）より低い。比率依存性のある T_g は、有効 T_g と呼ばれることがある。これらの目的のためには、 T_g が、典型的な市販のDSC（示差走査熱分析）装置で1分間あたり10°Cの比率で測定された値であるものと仮定される。しかし、図3の熱光学スイッチを動作している加熱率は、1分間あたり10°Cよりも非常に急速である。このデバイスの動作に適用する T_g は、デバイスを動作する比率での有効 T_g である。

【0021】

図2では、比率依存性のある T_g の概念を示す。まず上部曲線を調べる。有効ガラス転移温度 $T_{g\text{eff}}$ は、体積温度曲線の勾配の交点11、13の温度と定義する。本物の材料（理想でないもの）では、点線15、17によって示すように、曲折が急激ではない。曲折が観察される場所は、温度の変化率の関数である。すなわち比率1の曲線は急速な加熱率または冷却率を表すため、曲折すなわち $T_{g1\text{eff}}$ はより高い温度で発生する（つまり、比率1 > 比率2であれば $T_{g1\text{eff}} > T_{g2\text{eff}}$ ）。これは、ガラス転移温度は温度変化の比率が1桁変化するごとにおよそ3°C変化する（McKenna、1989年、またはJ. D. Ferry著「Viscoelastic Properties of Polymers」、第3版、Wiley、ニューヨーク、1980年）という十分確立された経験則である（たとえば、T. A. OsswaldおよびG. Menges著「Materials Science of Polymers for Engineers」、Hanser Publishers、ミュンヘン、1995年参

照)。この比率は、1ミリ秒に10°Cを越えて変動する可能性のある熱光学デバイスを、1°C/分のDSCによって測定されたガラス転移温度に比較する場合にきわめて重要な係数である。この場合の比率の差は約6桁である。この経験則によれば、このような熱光学デバイスの有効T_gは、DSCで同じ材料システムについて測定されたT_gより約18°C高い。非常に急激な熱光学スイッチは、T_gより24°C程度高い有効T_gを有することがあり得る。熱の変動が100ミリ秒で3°Cの、緩やかな上昇の熱光学スイッチでさえ、なおも1分間あたり10°CでDSCによって測定されたT_gより約9°C高い有効T_gを有することになる。

【0022】

本発明の好ましい一実施形態は、図3に示すように、熱光学的に制御される光ポリマー・ウェーブガイドTIR(全内部反射)デバイス100である。熱光学デバイス、すなわち制御の対象になる光エネルギーを熱的手段によって輸送するデバイスとしてこれは、光放射の切替え可能な偏向器として機能する。透過性ポリマー、すなわち光放射が所期の動作波長で所定の極小な減衰量にて内部を伝播するポリマーを使用して光を導く。

【0023】

図3では、多層スタック、すなわち1層ずつ上に載せて形成した複数の層が構成され、光透過性ポリマーの下部被覆層2が基板4上にある。この下部被覆は、スピニング・コーティングで堆積されたポリマーが好ましい。別法では、層2は、無機または非架橋有機材料であることが可能である。当業者に周知のどのような堆積方法でも適切に選択して代替層を堆積できるであろう。従来技術で周知のように、フォトレジスト工程とRIE(反応性イオン・エッティング)工程とを組み合わせたリソグラフィによる区画を使用して、下部被覆層2を通るトレンチ5を作成することができる。これもまたスピニング被着されたコア層6が下部被覆より上にあり、トレンチ5を充填している。スピニング工程は表面を平坦化しやすい被膜を生成するので、トレンチ5が充填される。第3の光学層の上部被覆10もまたスピニング被着される。当技術分野で周知のように、各層の厚さはスピニング速度を選択することによって調整する。層の厚さは、それぞれ約5μm、1.2μm、および1.4μmである。加工し終えると、3層4、6、10からなる実験構造で使用し

た材料は、それぞれ屈折率1.488、1.522、および1.422を示した。深さ約 $0.06\mu\text{m}$ および幅 $6\mu\text{m}$ のトレンチを使用して、980 nmでのシングル・モード導波を達成した。

【0024】

使用した材料は、Corning 1734ガラス製基板4、Gelbst UMS-992ポリアクリレート(T_g 45°C以下) 製下部被覆2、Norland Optical Adhesive 68 (T_g = 35°C) 製コア6、およびGelbst UMS-182ポリアクリレート(T_g 0°C未満) 製上部被覆10であった。3つのポリマー材料はすべて、製造者によって指定されたようにUV硬化ステップによって架橋されている。これらの材料は、全体の寸法上および化学的安定性を改善するために選択された。しかし、このように構成されたデバイスで本体の寸法上または化学的な不安定性の証拠は発見されていない。

【0025】

ウェーブガイドは、ガイド構造の回折効果または曲率に関わらず、光路沿いにその長さ全体にわたって波動を伝播させる構造である。図3に示すウェーブガイド部分(ウェーブガイド12の所定の部分)は直線であるが、ウェーブガイド形状は、望むなら容易にきわめて複雑な構造にすることができる。エッティング・ステップでフォトレジストを形成するのに使用するマスクを適切に製作することによって、曲線、X分岐およびY分岐、パラレル・カプラーを含むウェーブガイド構造を組み込むことができる。光学ウェーブガイドは、取り囲んでいる媒体に対して屈折率が上昇する長い境界領域の長さによって区画される。導波すなわち波動の閉じ込めの強度は、波長、屈折率差、およびガイド幅に依存する。強く閉じ込めるほど一般にモードが狭くなる。ウェーブガイドは、閉じ込めの強度に応じて多重光学モードでもシングル・モードでもサポートできる。一般に、光学モードは、その偏光状態による二次元の電磁界の平面形状によって、およびその波長によって区別される。光学モードが経た屈折率変化が十分に小さく(たとえば、 $n=0.003$)、およびガイドの寸法が十分狭い(たとえば、 $5.0\mu\text{m}$)場合は、ウェーブガイドが波長の範囲にわたってシングル横断モード(最低順位のモード)を含むのみとなる。屈折率差が大きい、かつ/またはウェーブガイドの

物理寸法が大きいと、光学モードの数も増加する。

【0026】

この性質のウェーブガイドは、一般にリブ・ウェーブガイドと称される。エッチングされたトレンチの寸法（リブの深さおよび幅）が、コア層の厚さと共に慎重に制御され、伝播モードの数および形状を制御する。好ましくは、ウェーブガイドは1つの最低順位のモードのみをサポートするように設計し、より高い順位のモードに伴う複雑さをなくする。より高い順位のモードは、より低い順位のモードよりも異なる伝播定数を有し、またより高い散乱損失を有するので、一部の用途では問題となることがある。より高いパワーが望ましいその他の用途では、より高い順位のモードのほうが有利な場合もある。

【0027】

特定の一実施形態では、 $80/20\text{NiCr}$ の 100nm 層を上部被覆層上にスパッタし、順番に当技術分野で周知の標準的なリソグラフィ手段によってエッチングして、ヒータ一片8などのパターン付き構造を形成する。この場合は温度制御システム（電流源）である制御システム19は、抵抗性加熱要素8である熱励振要素を制御する。抵抗性要素は、斜めの角度（数度）を付けて、その下のウェーブガイド・チャネル5に向けられている。この制御要素は、所望の動作温度が達成できるように加熱要素8の先端部の拡張領域を覆う薄い金の層として製作されたアプリケータ電極を介して、加熱要素に十分な量の電流を供給する。抵抗性加熱要素8は、加えられた電流に応答してデバイス内に温度変化を引き起こすので、励振器である。制御システム19は、デバイスを動作に導く電流の生成および制御を行う制御システムであるという点で励振器の不可欠な部分を形成する。時間の関数としてスイッチ100内で達成される温度上昇は、デバイス温度などの外部要因とは本質的に独立である。というのは、加熱エネルギーが短いパルスの間に加えられるためであり、パルスの時間依存性は、デバイス内へのその拡散によって決まる。抵抗性加熱要素8は、上部被覆上に堆積された金属（好ましい実施形態ではニッケルクロム）またはその他の適した導電性材料などの電気的な導性のある材料である。堆積はまた、このような材料を被着させるための化学蒸着またはその他の適切な技法によって達成できる。金属電極の場合は、電極よ

り下に堆積した追加コーティングを組み込んで、導かれる波動モード内のエネルギーの一部が金属電極へ延長して発生する光学損失を減少させるのが最もよい場合がある。

【0028】

$800\mu m$ という加熱要素の長さは、加熱要素がウェーブガイドをまたいでいる領域の前とその奥へ十分に延長し、加熱要素を活性化することによって、ウェーブガイド内を伝播するモードのエバネッセント領域によって感知され得る温度変化をポリマー内に発生させるようになっている。

【0029】

約 $20\mu m$ という加熱要素の幅は、ウェーブガイドの加熱された領域を介しての光放射の光トンネリングを防止するため、または実質的に減少させるために選択されている。光トンネリングは、高屈折率領域から低屈折率の領域を介して屈折率のより高い領域に至る光の結合である。一般に、光トンネリングの長さは、導かれる光の波長と、加熱された領域の屈折率変化の大きさと、加熱されたウェーブガイド領域の長さとに依存する。

【0030】

平衡温度へ戻すのは、冷却要素を使用して実施する。冷却要素は、対流、伝導、または放射のいずれかによって熱エネルギーの除去を補助するいかなる要素でもよい（たとえば、熱電子冷却器、ヒートシンク、熱パイプ）。冷却要素は、熱光学デバイスに接続された要素の公称動作温度を調節する。好ましい実施形態では、熱負荷が低いため、ガラス基板を冷却要素として使用する。用途によって、セラミック、シリコンなど、またはダイヤモンドさえも熱伝導性のより高い基板を使用することができ、またペルチエ効果（TE）冷却器、ベーパー・ウィック冷却器、または水冷あるいは強制空冷熱交換器などの能動的な熱除去ステップを使用することもできる。これらの冷却要素の効果は、デバイスが望むとおり連続的または断続的に動作され得るようにする一方、なおも動作温度内に維持されるように熱エネルギーを除去するための経路を提供することである。

【0031】

動作温度は光路が横断する領域内のポリマー層の温度であり、熱励振要素内の

変化に対する光応答時間に比べて長く、デバイス外部の環境変化の時間に比べて短い時間にわたって平均した温度である。動作温度は、当技術分野で周知のように、センサ部で所望の温度（たとえば、最低動作温度）が維持されるようにヒーターまたは冷却器の動作を調整するフィードバック・ループを備えたセンサによって、所望の範囲内に制御されることが好ましい。この制御ループは、パルス率などの変化の効果に応じる準備をするため、フィードフォワードを含むことができる。最低動作温度は、周辺温度が、デバイス動作に合わせて指定された温度、湿度などの値内で変わった場合の、熱制御ループを含めたデバイスが正常に機能することによって可能とされる最低の動作温度である。

【0032】

加熱要素が活性化されると、加熱要素からの熱エネルギーが取り囲んでいるポリマー層に拡散し、ポリマーの温度を上昇させながら、同時に熱光学効果によって加熱されたポリマーの屈折率を低下させる。加熱要素に近いポリマー領域は、加熱要素から遠い領域よりも単位面積あたりの熱エネルギーを多く吸収する結果として、より大きな温度の上昇を経る。図4は、スイッチが活性化されている間のポリマー・コア層内の屈折率の空間的な変動を概略的に示す上面図である。図に示すように、たとえば加熱要素（図示せず）に近接している領域22は、加熱要素から遠くに配置された領域24より低い屈折率を有する。

【0033】

加熱されたポリマーの屈折率変化が十分に大きく、加熱要素とウェーブガイドとの間の角度14が十分に浅い場合は、ウェーブガイド内を伝播する光放射がTIR界面と呼ばれる界面20部で全内部反射を受け、光線17として図示された光放射がリブ・ウェーブガイドからそれる。それら放射17は、トレチ5によって区画された領域の外側にあるコア層によって形成された平坦なウェーブガイド内を伝播するが、そのほとんどがコア層6に対して光学的に垂直に閉じ込められる。スイッチの活性化によってウェーブガイドからそれた光は、回折格子、鏡、レンズを使用して、または当業者に周知の数あるその他の手段であって、層6（図3）によって形成された面の中または外へ放射を経路設定する手段のいずれかによって、使用、集光、または再経路設定することができる。

【0034】

それた光放射 17 は、たとえば光ルータ、センサ、変調器など多数の用途に使用できる。複数の加熱要素を 1 本のウェーブガイドに沿って配置し、いずれかのウェーブガイド加熱要素の近くでウェーブガイドから光を逸らすことができる。加えて、問題の用途に応じて、加熱要素の 1 つまたはそのアレイを、ウェーブガイドのアレイより上／下に配置することができる。

【0035】

光スループットは、TIRスイッチ 100 を横断した後でウェーブガイドから出る光線 18 の光パワーとして測定する。TIR反射の結果、スループットは加熱要素を活性化した時点で低下する。リブ・ウェーブガイド TIRスイッチの反射した光放射は、横方向のウェーブガイド閉じ込めを克服しなければならないため、リブ・ウェーブガイド TIRスイッチは、励振が同水準の平坦型ウェーブガイド・スイッチほど効率的でない場合がある（平坦型ウェーブガイド・スイッチは、図 3 を参照しながら上述したような方法で製作されるが、トレンチは製作せず、入力光線は層 6 の面に対して垂直な一次元だけに閉じ込められる）。

【0036】

図 5 a は、時間の関数としてのウェーブガイドのスループット 90 を表したものである。図 5 b は、スイッチが電流パルス 92 によって制御され、時間 t_9 でスイッチに最大電流を供給して、それを初期状態に戻る時間 t_{10} まで継続することを示す。図 5 b に示すように、制御電流パルスは t_9 でオンになって t_{10} でオフになるが、スイッチの光応答（スループット）は瞬間的でない。図 5 c は、1 つの熱エネルギー・パルスの送達によってヒーター要素下の所与の深さで誘発される屈折率変動を示す。ポリマー材料の屈折率プロファイル 94 は、加えられた電流パルス 92 の結果、時間の関数として変化する。光学モードが経る屈折率の不連続性が全内部反射（TIR）に必要とされる水準に向かってそれより上に上昇すると、光はその不連続性をそれで、スループットは図 5 a のように下降する。電流パルスによって供給された熱にスイッチが応答することを可能にし、屈折率変化が時間 t_{11} での切替えを可能にして、 T_P の値から T_A の値にウェーブガイドのスループットが下がるようにするためにには、所定の時間が必要とされることが

わかる。熱を除去した後にスイッチが緩和することを可能にし、ポリマー材料の屈折率変化が反射の沈静をもたらし、かつ時間 t_{12} で初期値 T_P に（または実質的に近くまで）ウェーブガイドのスループットが再度上昇することを可能にするためにも所定の時間が必要とされることがわかる。図に示すように、ポリマー材料は、供給熱の除去に応答するのに長い時間を要し、それゆえに屈折率が初期状態に戻るために長い時間を要する。光スループットが平衡近くまで戻るための時間は、減衰時間として知られる。ここで減衰時間 ($t_{12} - t_{11}$) は、制御パルス ($t_{10} - t_9$) の幅より長い。

【0037】

設計されたウェーブガイドから所定の最小限の光放射のみがそれるような時間のスイッチの状態は「オフ」状態である。スイッチが「オフ」状態にある場合は、光がウェーブガイドの長さ全体を実質的に摂動されることなく伝播する。この状態は、スイッチの活性化前と非活性化後に起こる。一般に加熱要素によって送られた熱エネルギーに対する材料の応答は、ポリマーを介した加熱の熱速度によって制限される。これは、観察される切り替わった光が、ポリマー層の熱定数および多層スタックの構成要素の物理的厚さによりながら、加熱要素を介した電流の流れに係る時間内で遅れることを意味する。初めに活性化したスイッチを非活性化すると、光応答が加熱要素を介した電流の停止に係る時間内で遅れる。

【0038】

スイッチの忠実度

本発明を理解するためには、ポリマー材料の一定の特性を概観するのが有効である。線形システムでは、不定の入力信号に対するシステムの応答は、システムのインパルス応答との入力信号の畠込みによって得られる。このシステムのインパルス応答は、入力励振が変化し得るたびにシステム応答を測定することを必要とせずにシステム性能の正確な予測を可能にする。入力が熱源から来るポリマー・システムでは、従来、システムのインパルス応答の変化を引き起こし得る粘弾性効果からの著しい誘因があるため、指定された入力信号に対するシステム応答が修正される。このような場合には、実際のシステム応答が、システムのインパルス応答の測定に基づいて予測された応答に等しくないため、所望の信号を再現

する忠実度が損なわれている、またはシステム応答がゆがんでいると言われる。図6から8に示すデータは、粘弾性の挙動による応答の変化を示し、挿入損失の兆候は下記の説明のとおりである。具体的には、図6は、 $200 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ の熱パルスが幅 $16 \mu\text{m}$ 、長さ $1300 \mu\text{m}$ 寸法のヒーター・ストライプに加えられ、材料がAblestick L4092エポキシ、Epoxy-lite R46ポリウレタン、Epo-tek UV0134エポキシであって、基板から数えてそれぞれ厚さ $5.0 \mu\text{m}$ 、 $1.2 \mu\text{m}$ 、および $1.4 \mu\text{m}$ の3層スタックに配置され、およそ室温で動作したときの、2度の熱光学TIRスイッチを含んだウェーブガイドを介した光伝送を示す。加熱パルスは、 100 マイクロ秒 で始まる長さ 20 マイクロ秒 である。加熱パルスはスイッチのスループット応答に比べて非常に短いため、測定される応答は、システムのインパルス応答と本質的に等しい。このエネルギー水準では、 50 Hz ($30,000$ パルス) で 10 分間のパルス印加後のインパルス応答は、最初のパルス後のインパルス応答と同じである。したがって図6は、良好な忠実度および低いゆがみを有する扇形システムの例を示す。図6と同じ条件下で、ただし $350 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ というより高い熱パルスのエネルギー密度水準の条件で得た図7は、インパルス応答が $30,000$ パルス後に劣化していることを示す。ウェーブガイド伝送（スイッチ応答の前に見られる）は、先の値（挿入損失約 0.5 dB ）の約 90% に減少し、減衰時間は劣化して時間が延びる。この中でポリマー材料は、閾値より上へ追い込まれて強い粘弾性応答が始まっている。したがって、このウェーブガイド・スタックの閾値は $200 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ と $350 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ との間にある。本明細書では、閾値は重要な数量の値を意味し、閾値より下では実質的な変化はないが、閾値より上では変化が観察される。材料の粘弾性応答の結果、スイッチ・ヒーター・ストライプ付近のポリマーは、スイッチ・パルス間の時間（ 20 ms ）に比べて長い時間持続する屈折率の変化または「セット」を帶びた。この屈折率セットは、先には完全に「オフ」だったところで部分的にスイッチを「オン」に切り替えて、「オフ」状態であっても光の約 10% をウェーブガイドの外へ反射する。加えて、ポリマーの減衰時間は、閾値より上の励振に対する粘弾性応答によって遅くなつた。 $480 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ というより高い励振水準の図8は、粘弾性の挙動

が優位にある応答のさらに顕著な例を示す。この挿入損失は今や約 1.5 dB であり、信号のひずみは、遅い応答時間と複数の時間応答とを含んで複雑な挙動を示す。

【0039】

図 8 の極端な場合では、インパルス応答内に存在する複数のピークは、図 6 の閾値より下で動作するデバイスに比べて、不定信号に応答するスイッチに誘発される追加的な周波数成分があることを示す。これらの追加的な周波数成分は、スイッチ応答に望ましくないゆがみを導入する。

【0040】

本発明によれば、材料の温度を T_g より上に維持することによって望ましくない挙動を実質的に減少またはなくすることができます。というのは、この挙動は材料の粘弾性応答に結び付いているためである。選択肢は、動作温度より下の T_g を有する光ウェーブガイド材料を選択すること、または材料の T_g より上に動作温度を上げることである。

【0041】

スイッチ応答の忠実度に関するその他の特性（たとえば、図 5 に示す上昇時間 t_5 、下降時間 t_7 、活性化温度、およびスイッチ・ドエル時間 t_8 ）は、本質的に同様な動作条件下で動作のサイクルを繰り返した後、実質的に不变でとどまることができる。

【0042】

スイッチ挿入損失

本発明によれば、図 3 の 3 層スタックを製作するための 1 つまたは複数の材料を T_g より上の温度で使用することにより、ポリマー材料の粘弾性の挙動に伴ういくつかの性能問題を実質的になくする、または減少させる。

【0043】

材料の T_g または有効 T_g より下の温度では、熱励振が、加熱要素付近のポリマーにスイッチ・サイクル時間に係る持続性の屈折率変化を帯びさせる。この好ましくない屈折率変化は、様々な望ましくない効果を有することがある。この問題は、時間依存性のある部分的な運動性による。熱入力エネルギーは、先の状態

から離れてポリマー鎖を励振させる。しかし、非常に短時間の後で、鎖は温度が降下すると準平衡（低運動性状態）に達するが、先に経た構成よりも潜在的に異なる構成になる。この鎖構成の変化は、屈折率およびその他の材料特性の変化を引き起こす密度の変化を引き起こす可能性がある。大きな単パルスまたは複数の小さなパルスは、材料の屈折率に著しい変化を引き起こすことが可能である。しかし、本発明者等はまた、動作温度が T_g 付近またはそれより上になると、材料の粘弾性応答に好ましい変化があり、そのため長い時定数の屈折率変化が減少する（またはなくなる、すなわちデバイスの寿命中に効果が見られない程度に減少する）ことを発見した。一部の粘弾性誘因は、架橋ポリマー材料のガラス転移温度より上で減少する。

【0044】

摂動のないウェーブガイドの等しい長さに比べて集積光デバイスを横断することに観察される追加損失は、デバイスの能動挿入損失と呼ばれる。具体的には、図4を参照すると、スイッチがオンの場合に、ウェーブガイド・チャネル5内に結合された軸16に沿った入力光線は、TIR界面20から反射して離れ、ウェーブガイドの外に伝播して軸17に沿う逸脱出力光線を形成する。スイッチがオフの場合は、軸16の入力光線が界面を介して伝播し、引き続きウェーブガイドに沿って、軸18に沿う逸脱しない出力光線を形成するはずである。スイッチを活性化する前は、TIR界面部での屈折率差が小さいため、オフ状態での反射は非常に低いことが好ましい。「オフ」スイッチは、ウェーブガイド内の光の伝播から本質的に見えず、入力ガイド内での損失が非常に低くなることが望ましい。低挿入損失は、入力ウェーブガイドが多数のスイッチを有するバスの場合に特に望ましい。オフ状態のTIRスイッチ領域は、最初に製作されるときには無視できる程度の挿入損失を有することができるが、熱励振の結果として起こる長い時定数の屈折率変化が挿入損失を著しく増加させ得る。

【0045】

一実験では、120°C近く動作温度より上の T_g を有するコア材料が使用されている。ウェーブガイド軸から2度の角度が付けられたTIRスイッチは、ガラス基板上で厚さがそれぞれ 5 μm、1.2 μm、および 1.4 μm のAbles

stick L4092エポキシの下部被覆層 ($T_g = 53^\circ\text{C}$)、Epoxy-1
ite R46ポリウレタンのコア層 ($T_g = 150^\circ\text{C}$)、およびEpo-te
k UV0134エポキシの上部被覆層 ($T_g = 148^\circ\text{C}$)である。図6から8
は、それぞれ200、350および480 pJ/ μm^2 のエネルギーで活性化さ
れたこのスイッチの、時間の関数としてのスループットの測定変動を示す。

【0046】

具体的には、図6は、200 pJ/ μm^2 のエネルギーで活性化されたスイッ
チの最初の動作サイクルのウェーブガイド・スループット、および同じスイッチ
が50 Hz (30,000パルス) で10分間サイクルされた後のウェーブガイ
ド・スループットを示す。10分間のパルス印加の後、TIR切替えウェーブガイ
ドの応答は、最初のパルス後のインパルス応答と実質的に等しい。このデータ
から本発明者等は、このエネルギー密度が材料の粘弾性応答に起因する劣化の閾
値より下にあると結論付けた。

【0047】

図7は、粘弾性応答に起因する劣化の開始が起こる水準である350 pJ/ μ
 m^2 のエネルギーで活性化されたTIR切替えウェーブガイドのウェーブガイド
・スループットを示す。50 Hzで10分間サイクルした後は、ウェーブガイド
・スループットTP_k (スイッチ活性化の約100 $\mu\text{s e c}$ 前に測定) が最初の
パルスTP_jよりも前に測定されたスループットに比べて減少した。ウェーブガイ
ド・スループットのこの差は、熱サイクルによって誘発された挿入損失である。
追加損失は、加熱要素の領域で誘発された屈折率変化の長期持続性の変化による
ものであり、本発明者等はこれがポリマーの粘弾性応答に帰因するとしている。
図8は、結果的に大きな挿入損失 (30,000パルス後で26%以下) を発生
する480 pJ/ μm^2 というより高いエネルギーで活性化された同様なTIR
スイッチのウェーブガイド・スループットを示す。

【0048】

図9は、図6から8よりスイッチ・エネルギー密度の関数として計算された挿
入損失の再プロットである。図では、一定のエネルギーでスイッチを活性化する
前は挿入損失が無視できる。200 pJ/ μm^2 付近の特定のスイッチ・エネル

ギー密度Mより上では、観察された挿入損失がスイッチ活性化エネルギーによつて増加する。観察可能な挿入損失がスイッチ活性化によって増加するエネルギーは、粘弾性効果に起因する劣化の開始または閾値Mである。粘弾性効果に起因する劣化の閾値は、少なくとも時間、温度、エネルギーの量に関連している。

【0049】

図9のトレースKは、図3を参照しながら上述した好ましい、 T_g のより低いポリマーを組み込んだTIRスイッチの測定挿入損失を示す。粘弾性効果に起因する劣化の閾値の開始は、 $400 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ 付近の実質的により高いエネルギーで起こる。図9の高い閾値は、 $250 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ など、閾値より十分下の点で動作するデバイスの動作寿命にわたり、屈折率に無視できる程度の変化をもたらす。この動作点では、高 T_g 材料でできた従来のデバイスは故障する（つまり、動作寿命にわたって屈折率に測定可能な変化を示す）。本発明者等はこの性能の改善を、上部被覆の T_g をデバイスの動作温度より下へ実質的に減少させることによって、またコアの T_g を動作温度の近傍へ減少させることによって達成した。単パルスのデータでは、動作温度は 23°C の室温であることに留意された。複数パルスのデータでは、動作温度が室温より上にいくらか高められており、観察される応答に至る時間依存性のある粘弾性誘因を減少させ、屈折率の長い時定数の変化を減少させている。パルス・エネルギー密度 $200 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ から $1000 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ 、 50 Hz 動作で、室温より上に0から 50°C の範囲の温度上昇があることが期待されている。したがって、マルチパルス・データでは本発明者等は、上部被覆層を少なくともその T_g より 33°C 上で動作している。本発明者等のスイッチ応答の時間依存性から、本発明者等の有効 T_g は T_g より 21°C 上であり、そのため被覆層は、少なくともその有効 T_g より 11°C 上で動作している。本発明者等は、コア層を T_g より約 2°C 下、その有効 T_g より約 23°C 下で動作している。下部被覆は、 T_g より約 12°C 下、その有効 T_g より約 33°C 下で動作されている。

【0050】

上部被覆材料は、ヒーター・ストライプに直接隣接するところの本発明デバイス内で最高の温度変化を経る。コア層および下部被覆層は、熱拡散のためより低

い温度偏位を経る。それゆえ、上部被覆の T_g は動作温度より十分下にあるべきである。こうすることによって、図9に示す著しい改善となる。さらなる改善が、コア材料および下部被覆材料の T_g を下げることによって得られる。材料が T_g より上の動作温度で粘弾性応答を呈さないため、または極小の粘弾性応答を呈すため、長い時定数の屈折率変化は、上部被覆内では最低限に押さえられるか、またはなくなるはずであることが期待されている。図9で観察される閾値は、コア層および／または下部被覆層からの誘因に関連している。最適なモードは、デバイスの動作温度より下の有効 T_g を有するコアおよび下部被覆材料を提供することである。下記の経験則を使用すると、動作温度が T_g または有効 T_g より 20°C 上に維持されている場合に、粘弾性効果が発現しないことが期待される。

【0051】

材料のガラス転移温度は、上部被覆内で最低、および下部被覆内で最高であることが好ましい。この構成は、熱切替えパルスによって生成される応力（機械的または製作関連）または関連する摂動が、容易にスタックを介して運ばれ、切替えが起こり光が導かれる領域から運び去られることを可能にする。エネルギーは、運動性の高い（かつガラス転移温度の低い）材料で最も効率的に消費されるので、摂動がスタックを介して伝播する際に、応力およびその他の力が下部被覆に向けて追い込まれる。

【0052】

図1の粘弾性レジーム（C）は、弾性（B）レジームとプラスチック（A）レジームとの間にある。粘弾性は、完全または部分的に可逆であるが時間依存性であり、かつ化学結合または関連現象を回る回転を含む活性化された局所運動によるポリマー鎖のゆがみに関連するポリマー試験片の変形と定義される。通常 T_g 付近またはそれより下の温度帯域で観察される粘弾性効果は、ポリマー材料の時間依存性のある応答によって立証される。材料は、ひずみまたは加熱の比率によって著しく影響される。たとえば、一定率の応力で応力の最終値に達する時間が長いほど、対応するひずみは大きくなる。粘弾性レジームの正確な境界は決定が甘く、用途依存性である。共通の経験則は、粘弾性効果がガラス転移温度より 20°C 下からそれより 20°C 上の範囲内で、共通の実験時間スケールにわたって観

察されることである。正確な温度範囲は、ポリマー化学、試料の平面形状、および実験中または動作中の温度の変化率の関数である。粘弾性効果は、 T_g より120°C下でも観察された。徹底した議論については、左記に参照した Ferryによる著書を参考されたい。本明細書の目的としては、粘弾性という用語は、分子運動を含めて材料の線形と非線型両方の応答を包含する。熱励振は分子運動を誘発するため、粘弾性応答は熱光学デバイスで特に重要である。

【0053】

熱光学デバイスの構造用の材料を選択するに場合は、比率感度を図2に関して述べたように観察すべきである。高速でサイクルされるデバイスでは、材料が粘弾性誘因に影響されないままであるためには、そのガラス転移温度にその T_g より低い追加量を積む必要があろう。したがって、この効果は、比率が大きくなるほど、またはデバイスが動作する活性時間もしくは「オン」時間が短くなるほどより顕著になる。たとえば、ナノ秒パルスのデバイスは、約10桁の比率効果、あるいは T_g に比べて有効ガラス転移温度の30°C上昇を有するであろう。「バルク」または「大規模（巨視的）」ガラス転移温度の術語を使用して、緩やかな方法（膨張計など）で測定されたガラス転移温度を述べる。これは専門書および文献に頻繁にみられる種のガラス転移であり、通常、ガラス転移データと共に比率情報が示されていない場合は、データがバルクまたは平衡に似た特性を反映するように十分緩やかに測定されたことが含意されている。

【0054】

デバイスが60°Cのバルクまたは準平衡ガラス転移温度を有するポリマーを使用し、切替えがマイクロ秒規模で行われるように動作させる場合は（7桁の比率効果変化）、有効ガラス転移が約80°Cになると考えられる。準平衡法を使用して測定された $d n / d T$ は、（図1に示すように） $d n / d T$ が約60°Cより上に上昇することを示し、したがって、60°Cより上で動作するデバイスは高められた熱光学効果を示すはずであると結論付けられる。しかし、高速で切り替えられるデバイスでこの高まりを見るためには、このデバイスの動作温度を約80°Cより上に上げる必要があるあろう。

【0055】

ガラス転移温度より上でデバイスを動作することは、潜在的に問題である。非架橋材料は、 T_g より上では寸法安定性を失うため、流動する。この問題は実用上では、その材料を含み、その形状を維持し、その流動を妨げる剛性構造を有する材料で取り囲むことによって解決することができる。あるいは、この問題は、ゾルーゲル、架橋ポリマーなどの内で材料を架橋することによって、取り囲む構造を使用しないで解決することができる。架橋ポリマーは、多機能モノマー／ポリマーによって形成されるネットワークと定義される。架橋の緩い材料では、鎖部分の鎖の動きという小規模運動に伴う局所的な運動の自由が保持されるが、大規模な動き（流動）は拡散ネットワーク構造の制約によって妨げられる。最終品全体にわたって伸びる架橋ネットワークは加熱しても安定であり、線形ポリマーが流動または溶解する条件下で流動または溶解させることができない。架橋されたシステムではマイナス100°Cという低いガラス転移が容易に達成されており、ガラス転移の存在は、架橋が流動を妨げる一方で、ポリマー鎖が中程度から高い局所運動性を保持することを示す。架橋ポリマー材料でできた光デバイスをこのレジームで動作させることによって、寸法安定性を失うことなく、好ましい粘弾性の挙動を利用できる。架橋材料の化学安定性も一般に非架橋材料より高まる。たとえば、より低い溶剤浸透が溶解度を最小限にし、より大きな機能性が、使用中に分解または劣化を引き起こす可能性のある残留の反応性部位を制限し、材料のサイクルによって、安定な水および溶剤吸収に至る。

【0056】

粘弾性効果は、たとえば上述のように時間に伴うウェーブガイドの光スループットの変化を引き起こし、かつ／またはスイッチの上昇時間、下降時間およびドエル時間に影響することによって光切替えデバイスの劣化の誘因となる。粘弾性効果はデバイスの動作範囲を制約すること、および用途の仕様を制限することも、さらにデバイスの安定性ならびに寿命を制限することもできる。成功する光デバイスを構築および動作させるためには、粘弾性効果をデバイスの動作条件下で最小限に抑え、またはなくさなければならない。コアまたは被覆層の材料特性の永続的な（または持続的な）変動を引き起こす粘弾性効果はまた、スイッチ挿入損失などの故障モードの誘因になる可能性がある。考慮を要する他の劣化機

構には、疲労、クリープおよび老化が含まれる。

【0057】

疲労は、動的応力および変動する応力（熱光学ポリマー・デバイスの繰り返しの熱サイクルで経るものと同様）にさらされる構造内に発生する。疲労限界および疲労寿命は、架橋されていないものに比べて架橋ポリマーのほうが大きい。疲労とクリープ（緩やかな連続変形）とは、弾性の架橋ポリマー内で最小限に抑えられるか、またはなくなる。

【0058】

熱履歴は、粘弾性および熱機械性挙動を決定するうえでの重要なパラメータである。たとえば、アモルファス・ポリマーを T_g より上から冷やすと、自由体積または局所運動が増加し、これが緩和および回復を促進する。ポリマーを T_g より下でアニールすると、自由体積およびエンタルピーが減少し、降伏応力が増加し、かつ破断強さが減少する。（老化として知られるこの現象は、ポリマー研究文献に記載されており、たとえば、John M. Hutchinson 著「Physical Aging of Polymers」、Prog. Polym. Sci.、第20巻、1995年の703～760を参照されたい。）老化は時間に伴うポリマー特性内の変化を指し、脆化、屈折率の変化、密度の変化、および光デバイスの劣化を引き起こすその他の要因を含む。

【0059】

性能劣化を引き起こすその他の要因には、たとえばスイッチ効率などのデバイス性能効率を劣化させ得る、材料内の屈折率変化を引き起こす機械的応力の緩和および加工で誘発される残留応力が含まれる。ポリマー被膜を基板上に被着すると、堆積工程が被膜内に応力を誘発し、これが部品の製作に含まれる加工ステップがすべて完了した後にいくらか残留応力として残る可能性がある。これらの応力は、基板の水平面に対して垂直な方向に比べて、基板の表面の水平面内の方針が異なるはずである。応力は一般に光の屈折率に変化を生じさせため、このような示差的応力は、（水平面および水平面に対して垂直のそれぞれについて）TE および TM 偏光にわずかに異なる屈折率値を生じる。結果として、そのポリマー被膜は複屈折である。デバイスを 1 つまたは複数の被膜の T_g より上で動作させ

ることによって、この複屈折は最小限となる。T_gより上では、ポリマー鎖は、加えられたひずみの下で材料が緩和することを可能にする運動の自由度（その粘弾性特性、つまり鎖の剛性および架橋密度などのポリマーの特性に応じて可能とされる運動量に制限される）を帯びる。緩和は効果的に複屈折を減少させる。複屈折の現象は、多数の光デバイスにとって望ましい。

【0060】

後でさらに詳しく論ずるが、回折格子は、回折格子に異なる屈折率を経ることをもたらす、ウェーブガイド内を伝播している2つの偏光のため、特に複屈折に敏感である。回折格子の共振周波数（回折格子スペクトルの最大ピーク）は屈折率に依存するので、複屈折の被膜で製作された回折格子は、2つの偏光で異なる周波数依存性を呈することになる。したがって、そのようなデバイスをT_gより上で動作させて高い運動性緩和を利用すると、その性能特性が著しく改善される（その偏光依存性が減少する）。

【0061】

一般に、動作温度より下の有効ガラス転移を有する少なくとも1つの架橋透過性ポリマーを含む光学材料システムを使用することの利点は、部分的に次のように例示される。すなわち、粘弾性レジームより上で動作させることによって、熱サイクルは、サイクル時間の増加およびスイッチ挿入損失、すなわち密度ドリフト、屈折率変化、体積の漸変、熱応力の蓄積などの熱に誘発された材料変化に起因するスイッチ挿入損失などの時間依存性のある応答を引き起こさない。さらに、疲労、脆化、ひび割れ、および小割れを伴わずにデバイスをきわめて広範な適用温度／使用温度にわたって動作させることができる。これはデバイス性能、および所与のデバイス技術の商用可能性を高める。本発明で実施されたデバイスから得られる情報の再現性もまた高められる。というのは、時間依存性のある効果が最小限に抑えられるか、またはなくなるためである。

【0062】

上記に示すように、粘弾性効果は、デバイスの動作温度範囲を制約すること、および用途の仕様を制限することも、デバイスの安定性ならびに寿命を制限することもできる。動作中および使用中のデバイスに対する粘弾性効果を重要なすべ

ての時間スケール上で回避できれば、再現性があり、安定で強く動作できる時間に依存しないデバイスが得られる。本発明は、粘弾性効果に影響されることの少ない光電子および光子デバイスを提供する必要性に対処する。

【0063】

粘弾性効果による材料特性の劣化は、様々な故障機構をもたらす可能性がある。粘弾性効果は、加えられた振動の時間スケール上で長い、ポリマー部分の時間依存性のある構成の結果である。市場で効果的に競争するためには、性能および信頼性両面の進歩を達成しなければならない。粘弾性効果による材料特性の劣化は、密度、体積、熱（熱伝導性、熱膨張係数）、機械的（応力緩和、係数）、電気的（誘電定数）、磁気的（磁化率）、光学的（屈折率、損失）、化学的（溶剤安定性、環境安定性）、および加工（残留応力、製作容易性）特性の変化に関連する故障メカニズムを含む。上記の粘弾性効果による劣化は、測定の時間スケールにわたって観察されるかどうかに関わらず、独立して起こることも、連続して起こることも、あるいは組み合わせで起こることもあることに留意されたい。

【0064】

上述の材料を使用してこの実施形態で製作されたデバイスは、T_gより上で材料の粘弾性特性を利用することによって得られる多数の利点を有する。これらの利点は、それだけには限らないが、高められる熱光学係数、改善される切替え効率、減少されるエネルギー消費、速いスイッチ応答時間、改善されるサイクル時間、延長される動作寿命およびスイッチ忠実度、減少するクリープ、温度の関数としての屈折率の直線性、および減少する複屈折を含む。

【0065】

高められる熱光学係数

具体的にはTIRスイッチでは、より大きなd n/d T値はより低い動作温度を使用することを可能にする。したがって、より低い設計温度を利用するためには、熱光学係数の大きいポリマーを使用してデバイスを製作することが望ましい。図1の縦軸は、材料の屈折率に対する乗定数によって関連づけられている。d n/d Tの大きい値は、T_gより上で動作させることによって得られることになる。本発明者等は、いくつかのd n/d t値をT_gの関数として測定した。下記

の表1には、いくつかのポリマーについて $d\eta/dT$ の値が記載され、これらの結果は、本発明者が得たか、または R. S. Moshrefzadeh の「J. Lightwave Technol.」、第10巻、1992年4月、pp. 423~425 内に報告されていた。ポリスチレン (PS)、ポリ(メチルメタクリレート) (PMMA)、ポリカーボネート (PC)、ポリイミド (PI)、およびポリウレタンは高 T_g ($T_g > 100^\circ\text{C}$) 線形ポリマー(熱可塑性物質)であり、Norland 61、Norland 68 は、それぞれ約 100°C および 35°C の T_g を有する架橋エポキシである。本発明者等は、架橋が緩く T_g のより低い材料で、 T_g のより高い線形の架橋材料に比べて 2 倍から 3 倍の熱光学係数を観察した。

表1

| 材料 | $d\eta/dT (\times 10^{-4}) [1/\text{°C}]$ | $T_g [\text{°C}]$ |
|------------|---|-------------------|
| ポリイミド | -1.5 | 250 |
| ポリウレタン | -1.4 | 150 |
| PC/MA | -1.3 | 130 |
| PS | -0.83 | 100 |
| PMMA | -1.1 | 100 |
| Norland 61 | -2.6 | 80 |
| Norland 68 | -3.1 | 35 |

【0066】

Norland 架橋ポリマーを使用すると、動作条件でポリマー鎖の局所運動性が高まるため、 $d\eta/dT$ の高い値が得られた。すなわち、より低いガラス転移はこの実験のより高い運動性を含意する。表1のデータは、さらにポリマーの T_g を動作温度より下に下げることによって、熱光学係数をさらに高められる可能性のあることを示している。

【0067】

切替え効率

上述した集合から材料を使用すると、まったく同じ条件下(同じ波長、スイッチ・エネルギーなど)で動作させた、高 T_g 材料を使用して製作された同様のデ

バイスに比べて、切替え効率の増加が得られる可能性がある。増加する切替え効率は、TIR界面で同じ屈折率差を誘発するのに要するスイッチ活性化エネルギーがより低いことに由来する。

【0068】

上記の例では、TIRスイッチが、用途および使用領域に応じて、ウェーブガイドから所定の最小限の光放射のみがそれるような温度範囲で動作するように設計されている。切替え効率は、まずデバイス活性化の前にウェーブガイド・スループット T_p を測定し、次いでスイッチ活性化中の T_A で測定することによって決定される。スイッチ効率は、式 $e_f = 1 - T_A / T_p$ を使用して計算される。切替え効率は、スイッチが「オフ」状態にあるときのウェーブガイドのスループットに比較して、スイッチが 50 Hz の繰り返しパルスを印加されて活性化されているときのウェーブガイドからそれる最大限の光放射を指す。

【0069】

表2は、温度 23°C 付近で動作された熱光学TIRスイッチを含むデバイスでのスイッチ効率測定の結果を記載する。デバイス1は、ガラス基板上に上述の高 T_g 材料セット (Epo-tek/Epoxy-lite/Ablestick) を含む2度の熱光学スイッチであった。デバイス2は、ガラス上に低 T_g 材料 (Gelest/Norland/Gelest) を使用して製作され、公称上同じスイッチ平面形状および層の厚さを有する好ましい実施形態である。すべての測定で、 $200 \text{ pJ} / \mu\text{m}^2$ のエネルギーを加熱要素に送る電流パルスによって本質的に同様のTIRスイッチを活性化し、スイッチ効率は先に述べたように測定された。表2に示すように、本発明者等の T_g のよい低い材料システムを組み込んだデバイスは、非常に改善されたスイッチ効率を有した。スイッチ効率は、コア層の熱光学係数が $-1.4 \times 10^{-4} [1/\text{C}]$ から $-3.3 \times 10^{-4} [1/\text{C}]$ に変化したときに、0%付近から約80%に增加了。これらの結果は、光ウェーブガイドで使用するポリマーのガラス転移温度付近またはそれより上でデバイスを動作させることによって、スイッチ効率が改善できることを示す。

表2

| コア層 | T_g | 200pJ/ μm^2 時のスイッチ効率 |
|-----|-------|---------------------------------|
|-----|-------|---------------------------------|

| | | | |
|-------|----------------|--------|------|
| デバイス1 | Epoxy-Lite R64 | +150°C | 0%以下 |
| デバイス2 | Norland 68 | +35°C | 80% |

【0070】

本発明者等は室温デバイスを使用したが、そのT_gまたは有効T_gに等しいか、またはそれを越える公称動作温度で動作するようにデバイスを加熱することによって、T_gのより低い／運動性のより高いポリマーを使用したのと同じ効果をT_gのより高い材料で達成できる。

【0071】

スイッチ・エネルギー消費

この実施形態で製作されたデバイスは、スイッチ要素に少ない電気エネルギーを送るための制御要素を必要とする。というのは、大きい熱光学係数によって、T_gのより高い材料を使用して製作された同様なデバイスと同じか、またはそれより優れたスイッチ効率の達成がより低い動作温度で可能になるためである。この点をさらに示すため、本発明者等は、各デバイスで80%以下の所定のスイッチ効率を発生した電気エネルギーの量を測定することによって、上述のデバイス1およびデバイス2をテストした。表3は、ほぼ80%のスイッチ効率を達成するためにTIR加熱要素に供給された電気エネルギーを記載する。図3のデータは、熱光学係数の大きい材料層を組み込んだデバイスのほうがT_gのより高い材料で構成されたデバイスよりも、同様のスイッチ効率を達成するために要する電気エネルギーが少ないことを示す。さらにまた、これらの結果は、光ウェーブガイドで使用するポリマーのガラス転移温度付近またはそれより上でデバイスを動作させることによって、スイッチ・エネルギー消費が削減できることを示す。

表3

| コア層 | T _g | 80%スイッチ効率のエネルギー |
|----------------------|----------------|------------------------|
| デバイス1 Epoxy-Lite R64 | +150°C | >450pJ/μm ² |
| デバイス2 Norland 68 | +35°C | 200pJ/μm ² |

【0072】

スイッチ・サイクル時間

この実施形態で製作されたデバイスは、TIRスイッチの活性化を達成するた

めの屈折率差を達成するために必要な最低動作温度がより低いため、所与の加熱率で高速なスイッチを生じる。図10は、2つの異なるポリマーTIRスイッチの温度応答を示す。トレースAは、TIRスイッチを活性化するためにある温度で動作される運動性の高い/ T_g のより低い/ d_n/dT のより大きいポリマーを組み込んだデバイスの温度応答を示す。スイッチは活性化温度 T_A に達し、時間 t_1 でTIR切替えが起こることを可能にする。スイッチが非活性にされた後で温度は平衡の値 T_E に戻り、時間 t_2 で元の温度に近づく。この運動性の高い/ T_g のより低い/ d_n/dT のより大きいポリマー・スイッチのスイッチ「サイクル時間」は($t_2 - t_0$)である。

【0073】

トレースBは、TIRを達成するためにある温度で動作されるより高い T_g ポリマー・スイッチを組み込んだデバイスを示す。トレースAのスイッチよりも大きい熱エネルギーを加えた後で、トレースBのスイッチは活性化温度 T_B に達し、時間 t_1 よりも遅れて時間 t_3 でTIR切替えが起こることを可能にする。スイッチが非活性にされた後で温度は平衡の値 T_E に戻り、温度は時間 t_4 で元の温度に近づき、結果的にポリマー材料の屈折率がその平衡状態に戻る。このより高い T_g のポリマー・スイッチのスイッチ・サイクル時間は($t_4 - t_0$)である。平衡付近の温度に戻るために、より低い温度からよりもより高い温度からのほうが長くかかるため、スイッチ・サイクル時間が増加することに留意されたい。スイッチ・サイクル時間は、光ウェーブガイドで使用するポリマーのガラス転移温度付近またはそれより上でデバイスを動作させることによって改善できる。

【0074】

上述の利点は、特定のデバイスで観察可能かどうかに関わらず、独立して起こることも、連続して起こることも、あるいは組み合わせで起こることもあることに留意されたい。

【0075】

実施するうえでは、多数の変形形態が本発明に適用される。最も重要なことは、ガラス転移温度を有する当技術分野で周知のいかなる材料もウェーブガイド材料に使用でき、それにはウレタン、シロキサン、アクリレート、弗素エラストマ

、アルケン、ジエン、アクリレート、メチアクリル、メタクリル酸エステル、ビニルエーテル、ビニルエステル、酸化物、および調整可能な T_g ならびに光透過性を有するエステルまたはおそらくその他のポリマーを含む。これらの材料は、ガラス、ポリマー、半導体、ゾルーゲル、エーローゲル、および／または金属を含む当技術分野で周知のその他の材料と組み合わせて、ウェーブガイド構造内（つまり、光放射の少なくともエバネッセント領域によって横断される）の材料の少なくとも 1 つが T_g より上で動作するポリマーであるとの条件で、所望のウェーブガイド構造を形成することができる。

【0076】

当技術分野で周知のその他の種の導波構造を使用することができ、それには下部被覆ではなくコア内に製作されたリッジ・ウェーブガイド、4 層（またはそれ以上）のスタックから形成されたパターン付きウェーブガイド、被覆荷重型ウェーブガイド、埋込み型ウェーブガイド、拡散型ウェーブガイド、フォト形成型ウェーブガイド、漂白型またはポール型ウェーブガイド、直列グラフト型導波構造などを、局所的な屈折率向上が所望の導波モード・パターンの境界内で生じるという条件で含む。局所的な屈折率向上は、ウェーブガイドの中心に対して対称でも非対称でもよく、当技術分野で周知のように、屈折率の異なる組み合わせを使用することもできる。使用できる当技術分野で周知のパターン付け技法は、ウェット・エッチング、インまたはアウト拡散、リフトオフ、レーザー・アブレーション、集中イオン・ビーム加工などを含む。使用できる当技術分野で周知のコーティング技法は、スピノ、押し出し、スロット・ダイ、蒸発または気相堆積、メニスカス・コーティング、積層などを含む。基板は、ガラス、シリコン、金属、半導体、ポリマーなどを含む当技術分野で周知の多数のうちから選択できる。

【0077】

当技術分野で周知のその他の抵抗性被膜を選択することもでき、被膜で得られる抵抗性が熱光学領域でウェーブガイドを加熱するのに適しているという条件で、それには NiCr、WSi、SiN、その他の金属ならびに化合物、およびアモルファス・シリコンなどの様々なその他の形態のシリコンを含み、これらの被膜はすべて、その他の種をドープして特性を改善することができる。抵抗性被膜

のパターンは、導電性ポリマー、Al、Cu、Pdを含む金属、はんだなどのその他の材料でできた電極構造を含むことも含まないこともできるが、これらの接続構造は、低い接触抵抗で制御要素に接続すべきである外部電子リードに接続する工程を向上させる高導電性材料でできていることが好ましい。

【0078】

その他のスイッチ要素（Y分岐スイッチ、交差ウェーブガイド、パラレル・カプラー、回折格子、電気光学および電気ひずみデバイスなど）をTIRスイッチの場所に使用することが可能である。望むとおりに代替デバイスが動作することを可能にするためには当技術分野で周知の一定の修正が必要とされることは、通常の当業者なら明らかであろう。たとえば、上記の例の熱光学ポリマー層に対して電気光学ポリマー層の使用を要する電気光学回折格子では、制御要素が電圧供給の形態になるであろう。上述の抵抗性加熱要素と同様な方法でウェーブガイドの上に配置された電極に電圧を供給すると、電気光学ポリマー層に電界が生じ、電気光学効果によって屈折率が変化する。ついには、スイッチを活性化すると、先の例のように光がウェーブガイドからそれることになる。しかし、発色団の2重架橋は、材料をそのT_gより上で動作させて好ましい粘弾性特性を利用する場合、その向きを維持するために望ましいであろう。一部の用途では、デバイスおよび材料の要件の必要に応じて追加層（たとえば、ヒーター用、密閉層用、不透明層など）を堆積することが有利な場合がある。

【0079】

TIRスイッチは透過性材料内で光放射の伝播を制御する制御器の例である。その他の例は、Mach-Zehnder変調器、Y分岐スプリッタ、回折格子、パラレル・カプラー、また一般的な熱光学、電気光学ならびに音響光学デバイスおよび加えられた応力またはひずみによって始動されるデバイスが含まれるその他多数を含む。

【0080】

これらの代替方法は、本明細書に記載の本発明のデバイスまたは実施態様のいずれかと組み合わせることができ、繰り返しユニットを製作でき、本明細書に記載の一デバイスの部品は、本明細書に記載の、または当技術分野で周知のその他

のデバイスの全部または部品と一体化できる。

【0081】

M a c h - Z e h n d e r 変調器

熱光学M a c h - Z e h n d e r 変調器の図を図11に示す。この図は、下部被覆層32、先に記載の多数の手段の1つによってウェーブガイド構造が形成された架橋ポリマーのウェーブガイド・コア層34、および架橋ポリマーの上部被覆層36で構成された多層スタックの3次元レンダリングを示す。コア層は、入力および出力ウェーブガイドのそれぞれ38および40、入力および出力y分岐のそれぞれ42および44、バイアスおよび信号ウェーブガイドのアーム46および48を含む。多層スタックの上面上のバイアスおよび信号ウェーブガイドの上には2つの抵抗性加熱要素が配置され、その一方はバイアス加熱要素50として働き、他方は変調加熱要素52として働く。制御要素56および54があり、それぞれ個別にバイアス加熱要素および変調加熱要素に電流を供給する。

【0082】

この光デバイスでは、光が入力ウェーブガイド38を介して入り、次いでここで光が入力y分岐内で分割され、バイアスおよび信号ウェーブガイドに伝播する。加熱要素への制御電流がない間は、バイアスおよび信号ウェーブガイド内を伝播する光が出力y分岐部で再結合され、相対位相に従って発展的または消滅的に結合し、最後に出力ウェーブガイド40を介してデバイスから出る。

【0083】

バイアス加熱要素に供給される制御電流は、温度T b i a s、したがってバイアス加熱要素の近くにあるポリマーの定常状態屈折率n1(T b i a s)を変化させるように調整される。熱光学効果によって引き起こされた屈折率変化は、干渉計の2つのアーム間の光位相差がほぼ $\pm \pi/4$ であり、最大輝度の半分が出力ウェーブガイド部で観察されるように、バイアス加熱要素近くの光の光路長を変化させる。次いで、変調された制御電流が変調加熱要素に加えられる。デバイスは半最大輝度の場所でバイアスされるため、後続のデバイス出力は、小さい変調電流として加えられた駆動電流に比例する。制御電流の変化が時間依存性のある光応答を引き起こす。

【0084】

変調電流を繰り返しサイクルする状態でのこのデバイスの最適な性能は、変調制御電流がオフになると平衡または平衡付近まで戻るポリマー材料と、そのポリマーの屈折率ドリフトがバイアス加熱要素付近で極小であることを要する。ポリマーの材料特性、たとえば屈折率、密度、体積が加熱要素の近くで時間と共に漸変する場合は、 $\pi/4$ の光位相のシフトを達成するために必要なバイアス温度が、当初設計された温度と異なることになる。このようなデバイスを従来技術のようにその光学材料の T_g より下で動作させると、差異のある屈折率変化が蓄積し、そのため出力 40 内で 2 本の光線の位相が不均衡になり、デバイス性能が劣化することになる。この劣化は、加熱と制御要素 50 および 56 によって制御されるバイアス温度を変化させることによって、部分的に補償することができるが、実用では、バイアス温度のドリフトには通常、追加の混成フィードバックまたは追跡電子機器が必要とされる。デバイスの簡素化と費用問題のため、追加の制御電子機器なしで正常に機能するデバイスを有することが望ましい。

【0085】

図 12 はバイアス温度の変化がどのように出力光の輝度に影響するかを示す。図は、バイアス・ウェーブガイド温度 (Tbias) の関数としての出力信号輝度を実線でプロットして示し、T1 で干渉計が当初バイアスされる温度を示す。材料特性が粘弾性材料応答により変化すると、デバイスの光応答もまた変化し、そのため異なる温度 T2 は、同じ $\pi/4$ の位相シフトを遂げることが必要となる（図の点線）。バイアス温度 T1 で動作するように設計されたデバイスは、もはや意図するとおりに機能しない。さらに、干渉計のいずれかのアームの導波特性が他との関係で（たとえば、粘弾性応答による密度の変化によって）変化すると、入力 y 分岐部での光の分割が不均衡になり、干渉計の明度比が時間につれて低下する。

【0086】

明度比の低下が無視できる程度の状態で、追加の制御電子機器を伴わずに意図する温度でデバイスを動作させるためには、無視できる程度の粘弾性応答の材料を使用することが望ましい。 T_g のより低い材料で構成されたデバイスは、粘弾

性効果によって影響を受けることが少ないのであらうから、観察可能な粘弾性応答を呈する材料で構成されたデバイスよりも信頼性よく機能すると考えられる。

【0087】

Y分岐スプリッタ

図13は、下部被覆層60、架橋ポリマーのウェーブガイド・コア層62（先に記載の手段によって内部にウェーブガイド構造が画定されている）、および架橋ポリマーの上部被覆層64を具備する3層スタックの上面図である。コア層は、入力ウェーブガイド66と、ある角度の分離部72を間に有する2つの出力ウェーブガイド68および70を含む。スタック上には、出力ウェーブガイドのほぼ上にあり、ほぼ同じ幅を有する2つの抵抗性加熱要素74、76が配置されている。各切替え要素は、どちらの電極も個別に活性化できるように、電流供給源80、82によって給電される。図はまた、1本の入力ウェーブガイドが78部で2つの出力ウェーブガイドに分割するウェーブガイド分岐を示す。加熱要素は分岐部分からオフセットされ、徐々に加熱することが可能である（他方（非活性側）に対してウェーブガイドの一方の分岐の軸沿いに見たとき）。

【0088】

加熱要素は、その付近のポリマー材料の温度を上昇させ、熱光学効果の結果として、未加熱の出力ウェーブガイドに比べて活性化された加熱要素の下にある出力ウェーブガイドの有効屈折率を低下させる。光は、当技術分野で周知のように、より高い有効屈折率を有する出力ウェーブガイド内に優先的に結合される。このような設計は、活性化された加熱要素近くの領域の断熱昇温を生じる。電流を加えないと、入力ウェーブガイドから分岐に入る光は、出力ウェーブガイド間で分割し合う。

【0089】

有効T_g付近またはそれより下の温度で動作するこのようなデバイスは、本質的に粘弾性効果による材料特性の変化を受けやすい。たとえば、一方の出力ウェーブガイドのポリマー材料における屈折率の永久変化の場合を、粘弾性効果の結果として他方に比べて考える。いずれかのウェーブガイドの加熱要素の下で、ポリマー材料の屈折率が繰り返しのスイッチ動作により漸変すると、加熱要素への

制御電流がない場合でも、より高い屈折率を有するウェーブガイドに光が優先的に経路設定される形態の障害が発生する。

【0090】

図14は、高T_gポリマー材料を使用するスプリッタのY分岐劣化モードを示す。図は、スイッチ76の所与の回数の動作サイクルを終了した後の各出力ウェーブガイド内の光パワーの例を示す。初期には、意図的にY分岐が両方の出力ウェーブガイドに等しくパワーを分配する。サイクルの回数が増えるにつれて、粘弾性効果が長い時定数の屈折率変化を引き起こし、分岐の対象性が損なわれる。ついには、どちらの加熱要素も活性化されていないときに、非対称性の高い状態で出力ウェーブガイドに光が分割される状態に達することがあり、デバイスはもはやオフ状態では所望のEDBスプリッタとして機能しない。漸変が線形であることを示したが、所与の用途での詳しいスループット変化の一時形態は、使用される材料、切替え制御信号の到達のパターンによって決まる。

【0091】

先に述べたように、加熱要素(76)の下でポリマー材料内に実質的に永久な屈折率変化が発生すると、光がより高い屈折率を有するウェーブガイド(68)に優先的に経路設定されることになる。光を出力ウェーブガイド(70)に経路設定するためには、出力ウェーブガイド70に対する損傷(材料特性の劣化)に起因する優先的経路設定を克服するための高電流が必要になろう。サイクルが繰り返される場合は、各サイクルで過度の損傷を受けることになる。上述の故障メカニズムは、T_gのより低いポリマー材料を使用してデバイスを作成し、そのポリマー材料のT_gより上で動作を可能にすれば、減少するか、またはなくなる。

【0092】

熱光学回折格子デバイス

実用デバイスでは、デバイスが制御信号の印加に直線的に応答することが望ましい。この特性は、線形応答を有し、そのためデバイス制御信号をデバイス応答に関連づけるための複雑なアルゴリズムを要するシステムに比べて、性能の制御および監視を行うデバイス電子機器が簡素化されるため望ましい。加えて、応答の直線性は、複雑でないデバイス動作の調整、チューニング、および制御を可能

にする。というのは、信号および応答が単純な派生関係によって関連づけられているためであり、制御信号が既知であればデバイス性能が予測できるためである。

【0093】

本発明の精神で動作される熱光学デバイスは、デバイスの動作温度より下の T_g を有する材料を具備し、したがってポリマーの屈折率が温度と共に直線的に無理なく変化するレジーム内で自然に動作する（図1の領域B参照）。

【0094】

対照的に、動作温度より上の T_g を有する材料で構成されたデバイスは、デバイスの温度が T_g より上に上昇するにつれて熱光学係数の勾配の変化を経る。この勾配の変化は、加えられた制御信号（温度）に対する屈折率の非線形応答を生じる。 T_g より十分下の温度（図1の領域A参照）で動作するデバイスもまた屈折率と温度の間に線形の関係を呈するが、これらのデバイスは T_g より上の温度で動作するデバイスより低い熱光学係数で動作するので、デバイスを不均衡にしたり、またはその挿入損失を増加することのある長い時定数の屈折率の変化など、上述の好ましくない粘弾性効果を経ることに留意されたい。

【0095】

所望の温度または屈折率を得るために調整できる要素は、図15に示すような回折格子などのデバイスを含む。ポリマー熱光学回折格子デバイスは、光フィルタ、アド／ドロップ・マルチプレクサとして、またはより一般的には熱光学的に回転可能なブラング（Bragg）回折格子として使用することができる。望ましい特性は、屈折率の長期安定性、大きな材料熱光学係数、温度の関数としての応答の直線性、および複屈折のないことを含む。これらの特性はすべて、その T_g より上で、および好ましくはその有効 T_g より上で動作する光ポリマー・ウェーブガイド材料で固有に獲得される。

【0096】

下部被覆94、コア100、上部被覆92で構成されるポリマー多層スタックを基板96上で製作することによって形成されたブラング回折格子を考える。コア層は、ウェーブガイド102内の光学モードが、今度は回折格子104を含ん

だ領域に重なり合っている（先に述べたような）ウェーブガイドを含む。この回折格子は、工程から所望の周期性を伴う屈折率の適切な変調が得られるとの条件で、エッチング、アブレーション、成形、打出し、積層、電子ビーム書き込み、ホログラフィック露光などを含む当技術分野で周知のいくつかの方法の1つによつて製作できる。回折格子周期（一般に光の波長程度）は、ウェーブガイド内を伝播するか、またはその中へ結合される光の少なくとも所定の波長でプラグ反射を達成するように選択される。プラグ条件を満たす波長の光は、他の経路へ反射または結合される。好ましい実施形態では、回折格子がウェーブガイド内で光を逆反射する。

【0097】

プラグ・ウェーブガイド反射体は、加熱電極106をデバイス上で回折格子要素の近くに製作することによって熱的に回転可能にできる。制御要素110が加熱要素に電流を送ると、熱光学効果の結果、ヒーターの近くにあるポリマー（回折格子）の温度が変化する。回折格子の屈折率変化が、プラグ条件を満たす光の波長に影響し、そのため今度は異なる波長がウェーブガイド内でプラグ反射される。この工程を他の温度で繰り返すと、次いで他の波長がプラグ反射条件を満たす。このようにしてデバイスは、多数の所定の波長でプラグ反射が達成されるように温度を選択することができるため、回転可能である。このデバイスは、単一の波長が所与の時間間隔にわたってプラグ反射条件を満たすように、通常は定常状態温度で動作されることに留意されたい。本発明の回折格子を具備するポリマー材料の線形温度変化は、このように温度に係る回折格子の共鳴波長の線形応答を生じ、したがって線形回転性を提供する。加えて、本発明の回折格子デバイスは、向上した熱光学係数により、広い共鳴波長の回転能力（帯域）を有することになる。

【0098】

これまで本発明について特定の実施形態を参考しながら述べてきた。この他の実施形態も通常の当業者なら明らかであろう。したがって、本発明の説明の一部を形成する添付の特許請求の範囲によって示される如きを除いて、本発明が制限されることは意図していない。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

アモルファス・ポリマー材料について、温度の関数としての体積の変化の概略を示すグラフである。

【図 2】

T_g の値が測定の比率の関数である有効ガラス転移温度の概念の概略を示すグラフである。

【図 3】

本発明による全内部反射 (TIR) スイッチの斜視図である。

【図 4】

図3のTIRスイッチのコア層を示す軸16-18に沿った横断面図である。

【図 5】

スイッチが活性化されている時間を経て取得されたTIRスイッチのスループット応答を示すタイミング図である。

【図 6】

最初のパルスおよび励振30000回後のパルスによる第1励振エネルギーで活性化された従来技術のTIRスイッチのインパルス応答を示すタイミング図である。

【図 7】

最初のパルスおよび励振30000回後のパルスによる高い第2励振エネルギーで活性化された従来技術のTIRスイッチのインパルス応答を示すタイミング図である。

【図 8】

最初のパルスおよび励振30000回後のパルスによる他の高い第3励振エネルギーで活性化された従来技術のTIRスイッチのインパルス応答を示すタイミング図である。

【図 9】

図6から8の従来技術のTIRスイッチと、本発明によるスイッチとが経た挿入損失を示す図である。

【図10】

従来のTIRスイッチと比較した本発明によるTIRスイッチの活性化に必要な温度を示す図である。

【図11】

本発明によるMach-Zehnder型変調器の斜視図である。

【図12】

特定形態の粘弾性の影響の発現がデバイス性能を劣化させる様子を示す図である。

【図13】

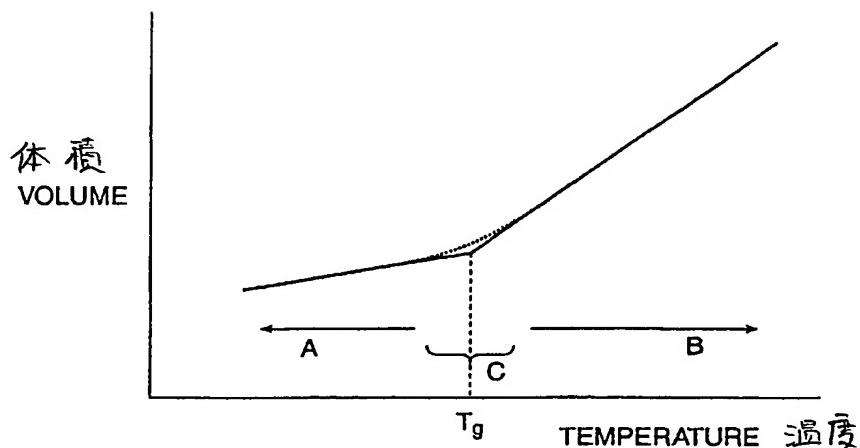
本発明によるY分岐スプリッタの斜視図である。

【図14】

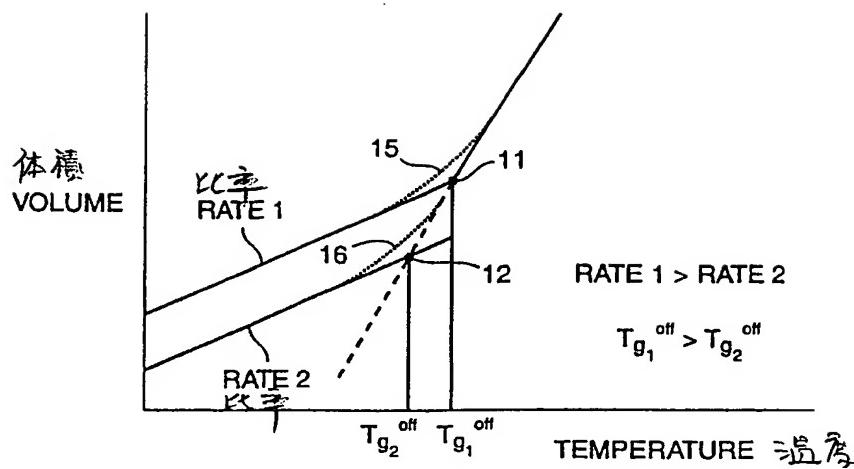
多数の動作サイクル後の、図13のデバイスへの従来技術のデバイスのパワー出力を示す図である。

【図15】

本発明による熱光学回折格子デバイスの斜視図である。

【図1】

【図2】



【図3】

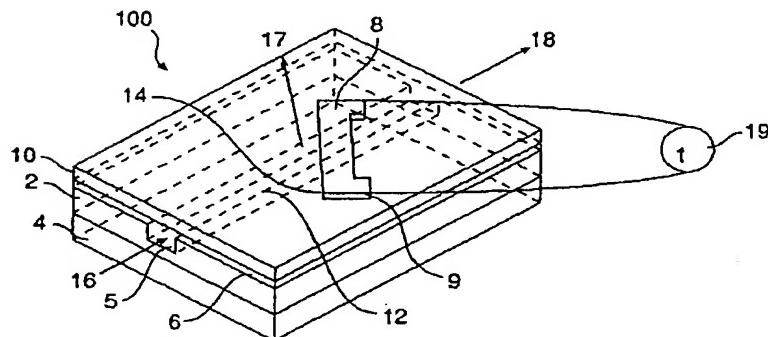


FIG. 3

【図4】

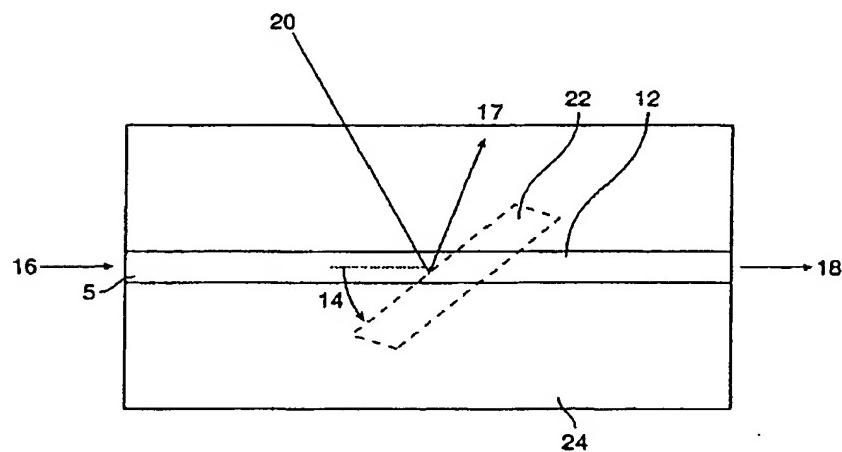
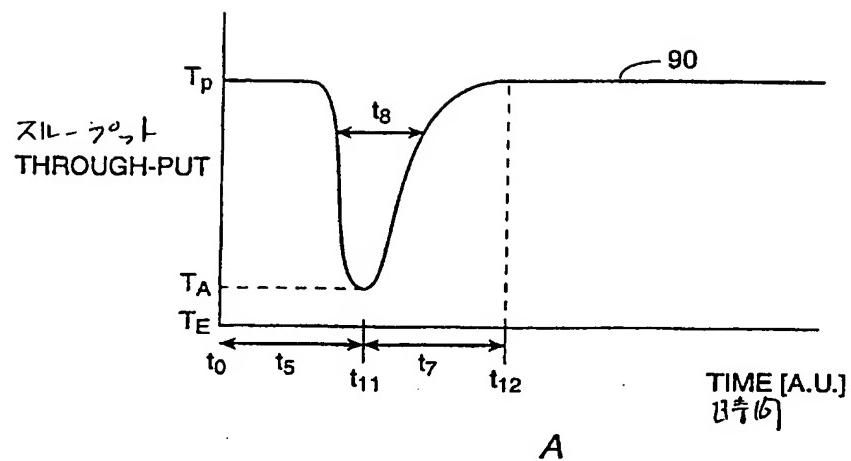
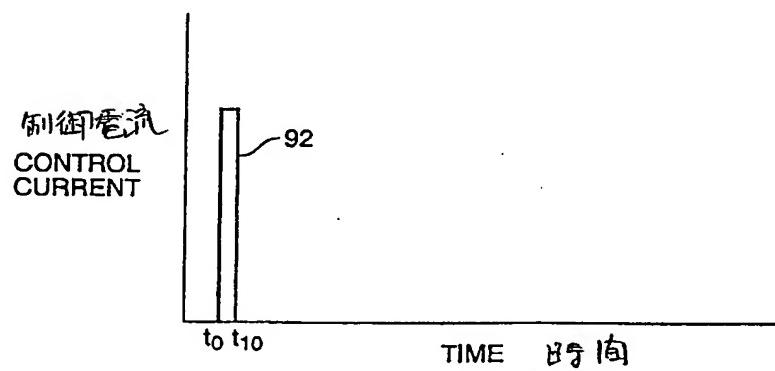


FIG. 4

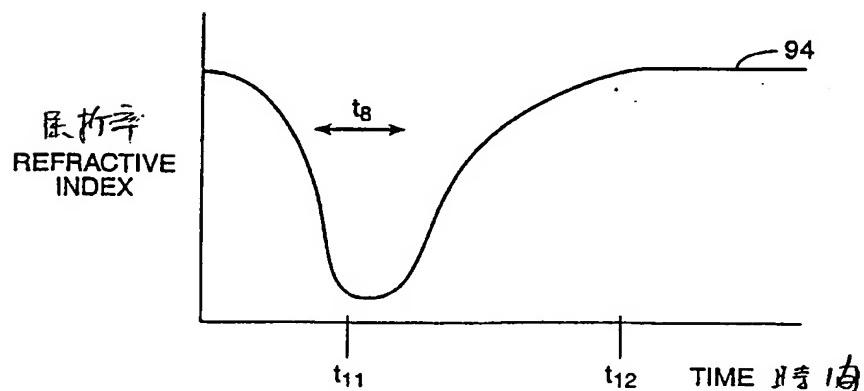
【図5】



A

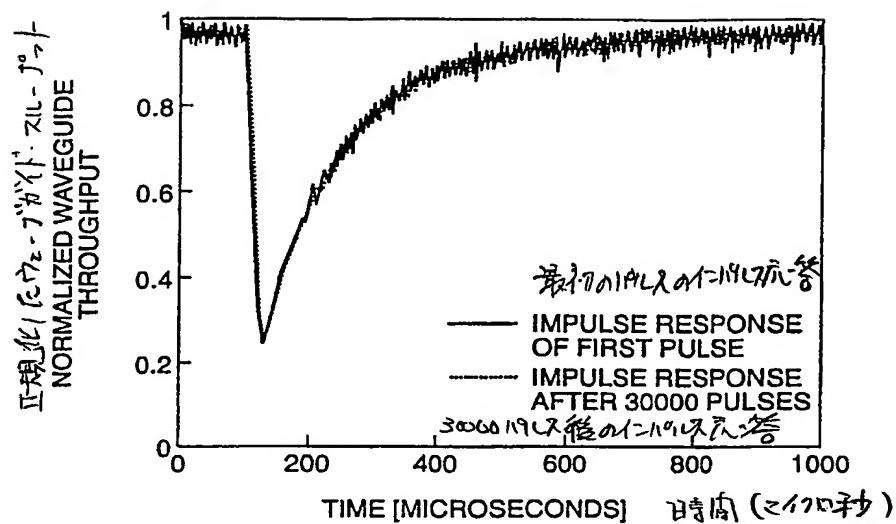


B

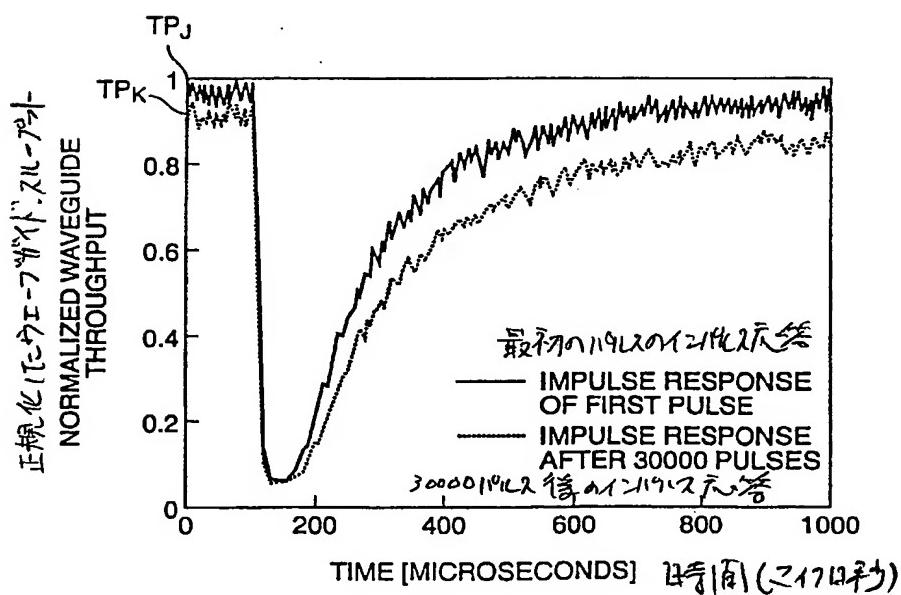


C

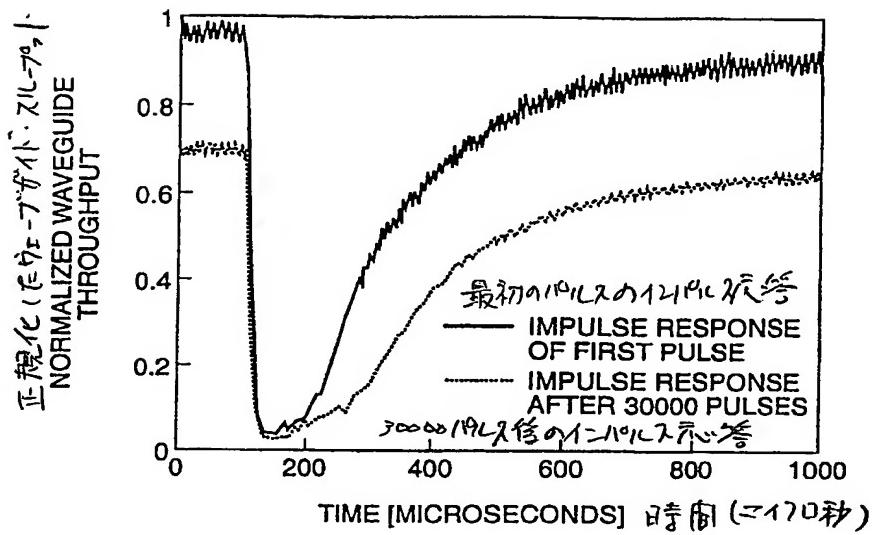
【図6】



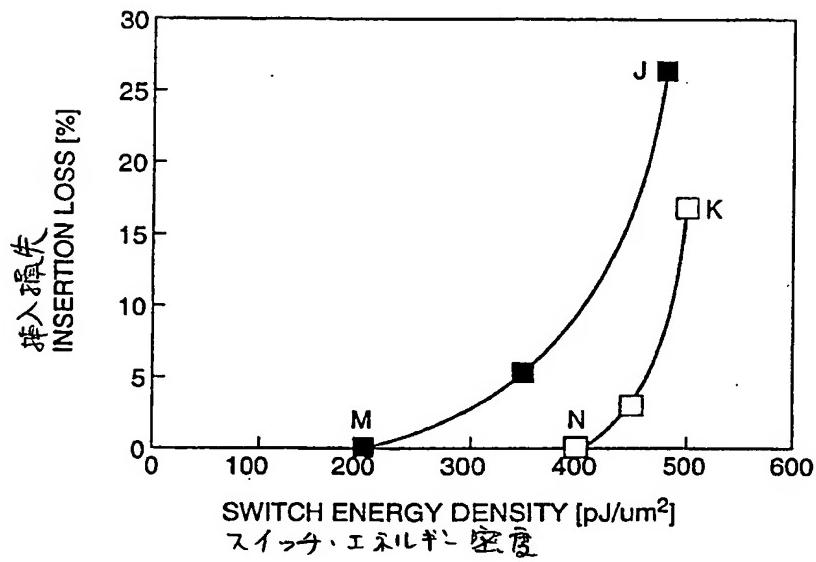
【図7】



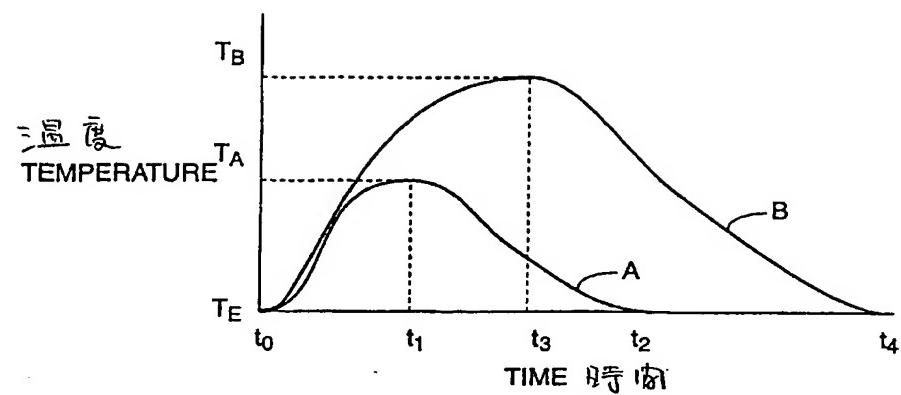
【図8】



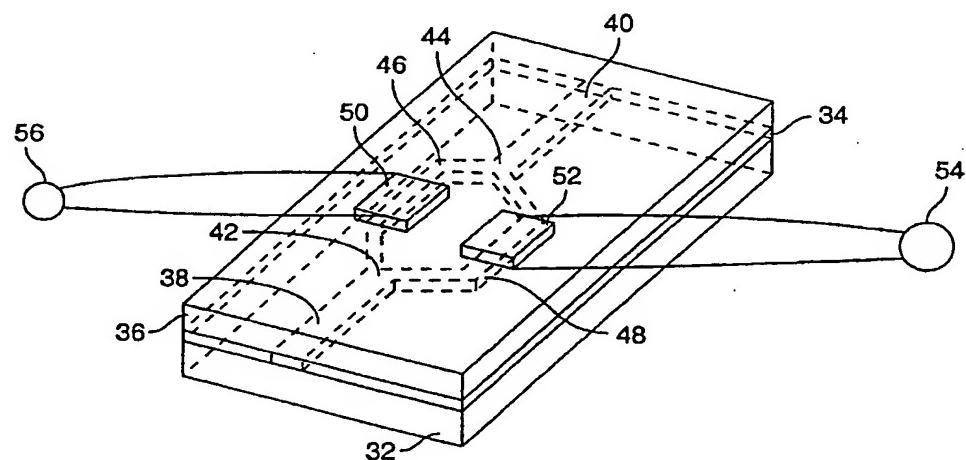
【図9】



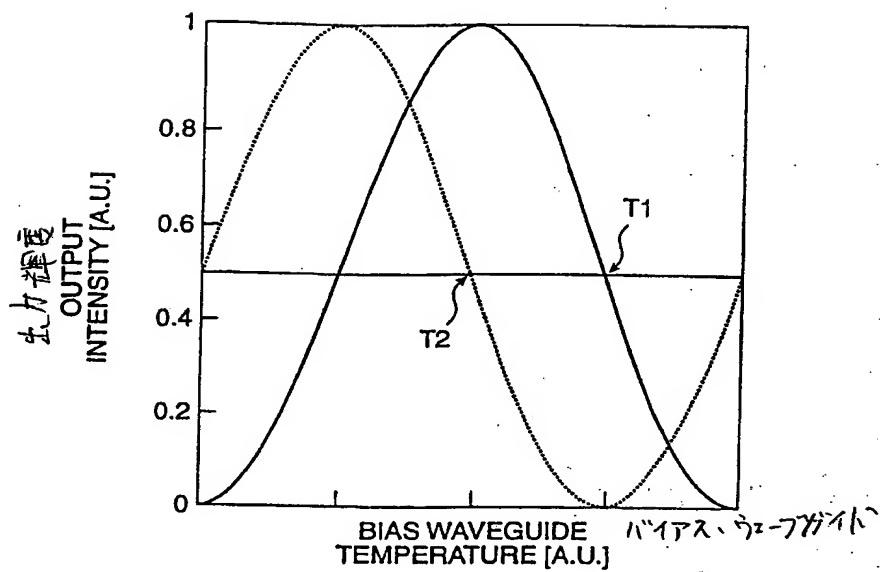
【図 10】



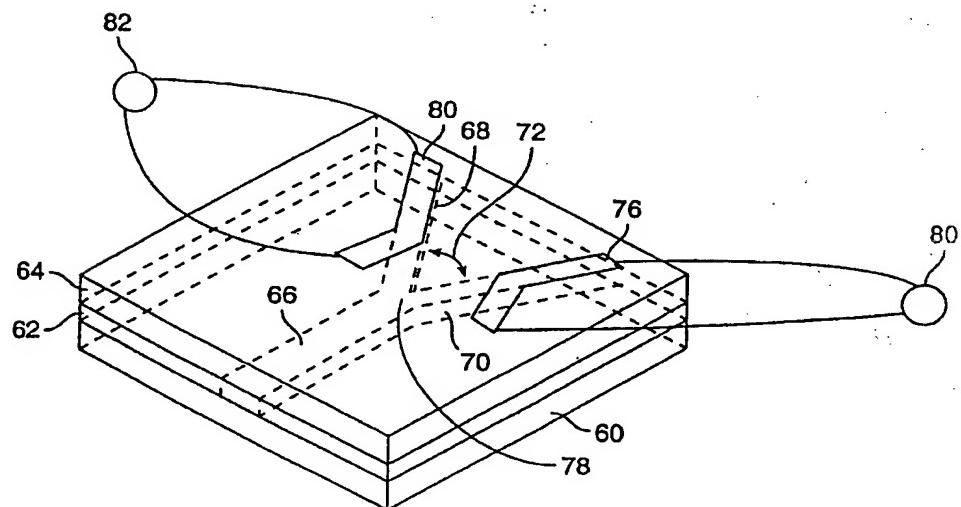
【図 11】



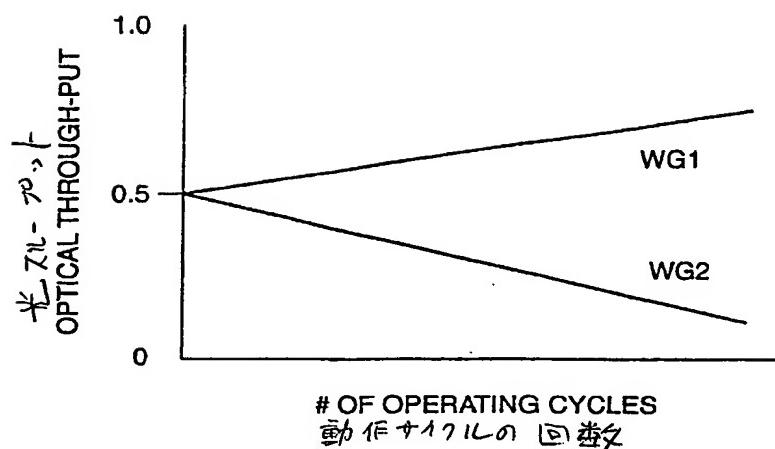
【図12】



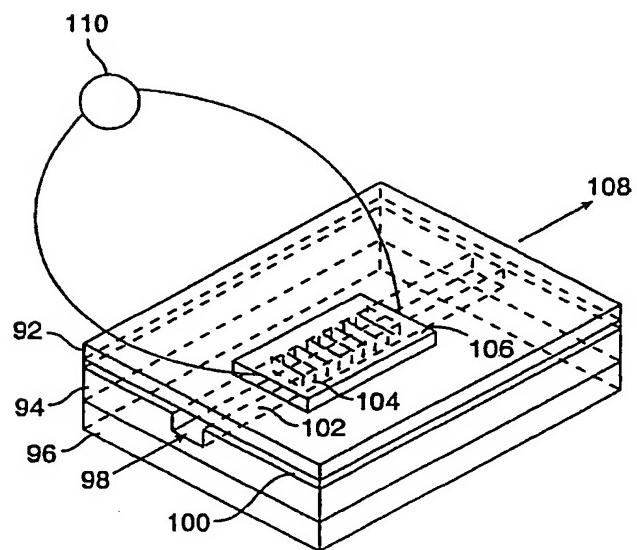
【図13】



【図14】



【図15】



【国際調査報告】

| INTERNATIONAL SEARCH REPORT | | International application No. PCT/US00 07630 |
|---|--|--|
| A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC(7) : G02B 06/12 US CL : 385/14, 122, 16, 37 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC | | |
| B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S. : 385/122, 1, 4, 37, 16, 141, 142, 143, 144, 145, 129, 132, 14 | | |
| Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched None | | |
| Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) East (BRS). Search terms: waveguide, polymer, heating, and switch. | | |
| C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| X | DIEMEER ET AL. Polymer Optical Waveguide Switch Using the Thermooptic Effect. Journal Of Lightwave Technology, Vol. 7, No.3. March 1989. Pages 449-453 | 1-6, 9, 11-16, 19-22, 27, 30-35, 37, 39-41, 44-54, 64 and 68-70 |
| A | MOOSBURGER ET AL. A Novel Polymer Digital Optical Switch with High Temperature Stability. Proc. 21 Eur. Conf. Opt. Comm. (ECOC'95)-Brussels. Pages 1063-1066. 1995. See entire document. | 1-70 |
| A | WU ET AL. Electrooptic Cardo-type Polymers with High Glass Transition Temperature. Americal Chemical Society Symposium Series 601. Pages 356-367. 1995. See entire document. | 1-70 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> | | See patent family annex. |
| * Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "B" earlier document published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed | | *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art *A* document member of the same patent family |
| Date of the actual completion of the international search 02 JUNE 2000 | | Date of mailing of the international search report 19 JUN 2000 |
| Name and mailing address of the ISA/US Commissions of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20231 Facsimile No. (703) 305-3230 | | Authorized officer HUNG NGO Telephone No. (703) 308-0297 |

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1998) *

| INTERNATIONAL SEARCH REPORT | | International application No. PCT/US00/07630 |
|---|--|---|
| C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| A | NAHATA ET AL. Thermal stable Polyester Polymers for Second-Order Nonlinear Optics. Apply Phisics Letter ^4(25). Pages 3371-3373. June 1994. See entire document. | 1-70 |
| A | US 6,047,098 A (SAGAWA ET AL) 04 APRIL 2000 (04/04/2000). see entire document. | 1-70 |

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1998) *

フロントページの続き

(81) 指定国 EP(AT, BE, CH, CY,
DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, I
T, LU, MC, NL, PT, SE), OA(BF, BJ
, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML,
MR, NE, SN, TD, TG), AP(GH, GM, K
E, LS, MW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW
, EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,
TJ, TM), AE, AG, AL, AM, AT, AU,
AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, C
N, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EE
, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR,
HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, K
P, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU
, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX,
NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, S
G, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ
, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZW

(72) 発明者 リー, イエオン-チエン

アメリカ合衆国・95051・カリフォルニア
州・サンタ クララ・ウッドハムズ オー
クス プレイス・802

(72) 発明者 ディーコン, デイビッド・エイ・ジイ
アメリカ合衆国・94022・カリフォルニア
州・ロス アルトス・サンタ リタ アベ
ニュ・884

F ターム(参考) 2H047 KA04 LA12 NA01 QA05 RA08
2H079 AA06 AA12 BA01 DA17 EA03
EA05 EB27 KA08
2K002 AB04 BA13 CA06 DA07 HA11

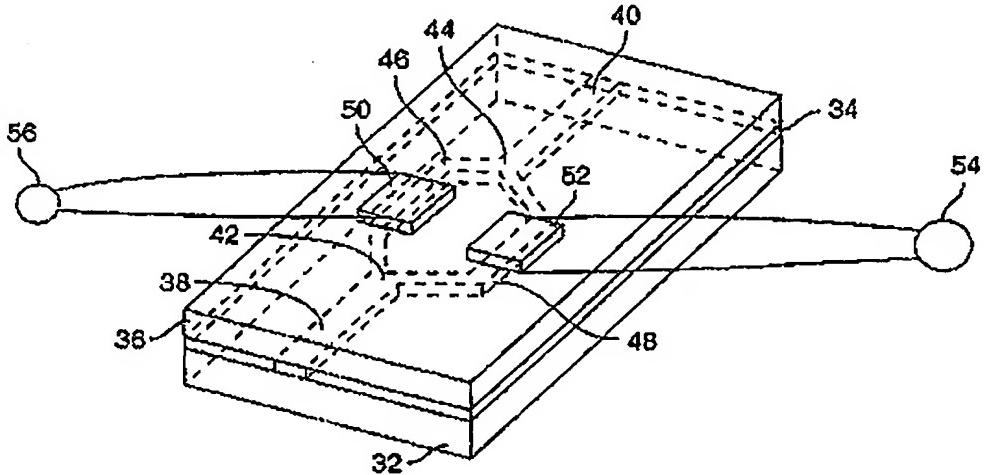
PCT

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION
International Bureau

INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

| | | |
|---|----|---|
| (51) International Patent Classification 7: G02B 6/12 | A1 | (11) International Publication Number: WO 00/57221 (43) International Publication Date: 28 September 2000 (28.09.00) |
| <p>(21) International Application Number: PCT/US00/07630</p> <p>(22) International Filing Date: 22 March 2000 (22.03.00)</p> <p>(30) Priority Data: 09/274,271 22 March 1999 (22.03.99) US</p> <p>(71) Applicant: GEMFIRE CORPORATION [US/US]; 2471 E. Bayshore Road, #600, Palo Alto, CA 94303 (US).</p> <p>(72) Inventors: LACKRITZ, Hilary, S.; 10952 Barranca Drive, Cupertino, CA 95014 (US). KOWALCZYK, Tony, C.; 1850 Ash Street, Palo Alto, CA 94306 (US). LEE, Yeong-Cheng; 802 Woodhams Oaks Place, Santa Clara, CA 95051 (US). DEACON, David, A., G.; 884 Santa Rita Avenue, Los Altos, CA 94022 (US).</p> <p>(74) Agents: OGAWA, Richard, T. et al.; Townsend and Townsend and Crew LLP, Two Embarcadero Center, 8th Floor, San Francisco, CA 94111-3834 (US).</p> | | <p>(81) Designated States: AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZW, ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).</p> <p>Published <i>With international search report.</i></p> |

(54) Title: OPTOELECTRONIC AND PHOTONIC DEVICES



(57) Abstract

Optoelectronic and photonic devices (100) are formed by employing polymer materials that have a lower glass transition temperature (T_g) than the nominal operating temperature. By using such materials, the local or segmental mobility is increased so that local stress is eliminated or minimized on the polymer material, making performance more robust. The current invention involves use of polymer in an optical device (100) in an operating temperature range in the region above T_g , where the polymer segments between crosslinks are allowed local freedom of movement; however, the large-scale movement of the material may be restricted by the crosslinked structure of the polymer material. The temperature operating point of a device constructed according to the invention is thus preferably distance from both the viscoelastic region near T_g and from the glassy region below T_g .

FOR THE PURPOSES OF INFORMATION ONLY

Codes used to identify States party to the PCT on the front pages of pamphlets publishing international applications under the PCT.

| | | | | | | | |
|----|--------------------------|----|--|----|--|----|--------------------------|
| AL | Albania | ES | Spain | L8 | Lesotho | SI | Slovenia |
| AM | America | FI | Finland | LT | Lithuania | SK | Slovakia |
| AT | Austria | FR | France | LU | Luxembourg | SN | Senegal |
| AU | Australia | GA | Gabon | LV | Latvia | SZ | Swaziland |
| AZ | Azerbaijan | GB | United Kingdom | MC | Monaco | TD | Chad |
| BA | Bosnia and Herzegovina | GE | Georgia | MD | Republic of Moldova | TG | Togo |
| BB | Barbados | GH | Ghana | MG | Madagascar | TJ | Tajikistan |
| BL | Belgium | GN | Guinea | MK | The former Yugoslav Republic of Macedonia | TM | Turkmenistan |
| BF | Burkina Faso | GR | Greece | ML | Mali | TR | Turkey |
| BG | Bulgaria | HU | Hungary | MN | Mongolia | TT | Trinidad and Tobago |
| BJ | Benin | IE | Ireland | MR | Mauritania | UA | Ukraine |
| BR | Brazil | IL | Israel | MW | Malawi | UG | Uganda |
| BY | Belarus | IS | Iceland | MX | Mexico | US | United States of America |
| CA | Canada | IT | Italy | NE | Niger | UZ | Uzbekistan |
| CF | Central African Republic | JP | Japan | NL | Netherlands | VN | Viet Nam |
| CG | Congo | KE | Kenya | NO | Norway | YU | Yugoslavia |
| CH | Switzerland | KG | Kyrgyzstan | NZ | New Zealand | ZW | Zimbabwe |
| CI | Côte d'Ivoire | KP | Democratic People's Republic of Korea | PL | Poland | | |
| CM | Cameroon | KR | Republic of Korea | PT | Portugal | | |
| CN | China | KZ | Kazakhstan | RO | Romania | | |
| CU | Cuba | LC | Saint Lucia | RU | Russian Federation | | |
| CZ | Czech Republic | LI | Liechtenstein | SD | Sudan | | |
| DE | Germany | LK | Sri Lanka | SE | Sweden | | |
| DK | Denmark | LR | Liberia | SG | Singapore | | |
| EE | Estonia | | | | | | |

OPTOELECTRONIC AND PHOTONIC DEVICES

5

BACKGROUND OF THE INVENTION

This invention relates to optical or photonic components, more particularly to optoelectronic devices formed of polymers.

Integrated optical devices (i.e., waveguides, switches, interconnects, and the like) are known which are constructed of polymer materials having a glass transition temperature (T_g) much higher than the operating temperature range of the device. The glass transition temperature is a range of temperatures over which significant local motion of the polymer backbone occurs. The T_g is usually defined as cooperative motion of about 10 backbone units, or a viscosity of 10^{14} poise, or a second order phase transition in heat capacity. The temperature at which the change in slope occurs in the rate of change of volume with temperature is considered the glass transition temperature (T_g), or softening point. For a detailed description of viscoelasticity and characteristics illustrated by Figs. 1 and 2, see G.B. McKenna, chapter 10, *Comprehensive Polymer Science*, Volume 2, Edited by C. Booth and C. Price, Permagon Press, Oxford (1989).

Crosslinked materials manifest a glass transition when the molecular weight between crosslinks is significant enough to allow cooperative motion of the backbone units. Thus, a lightly crosslinked material will show a glass transition; while a highly crosslinked one may not.

Below T_g , polymeric material is prevented from reaching equilibrium because of the limited amount of segmental motion. Thermodynamic (entropic) effects still drive change towards equilibrium, but if the temperature is far enough below T_g , those changes will occur at such a slow rate that it does not appear experimentally during the time scale of interest (in this case the time scale of observation).

There are several reasons why materials having a high T_g have been chosen in the past, including compatibility with electronics processing and packaging, maintenance of orientation of chromophores incorporated within the material, and environmental robustness and performance stability. The use of high T_g materials (materials with a T_g higher than the operating temperature of the materials in a packaged

- device) ensures device operation in a region in which the local motion of the polymer segments is significantly restricted, and that the material operates in a glassy state. It was assumed in the earliest development of polymer films for optoelectronic devices that use of high Tg materials was a requirement. "For example, many of the first research EO polymers, whether guest-host or side chain, are based on thermo-plastic acrylate chemistry and exhibit glass transition temperatures ~ 100 - 150°C . This low Tg results in high polymer chain diffusion rates and a variation of at least 10% in the optical properties of the poled state over 5 years of operation at ambient temperature. This rapid change is the natural consequence of the dynamic processes by which glassy polymers, operating close to Tg, undergo physical aging and relaxation to reduce stress and minimize free volume. When higher operating temperatures are considered (125°C), the stability of the optical properties becomes even worse." (extracted from the review paper by R. Lytel et al., in *Polymers for Lightwave and Integrated Optics*, L.A. Hornak, ed., Marcel Dekker 1992 pp. 460).
- Higher glass transition materials developed for integrated optoelectronics include polyimide materials (glass transitions ranging from about 250°C to well over 350°C) developed by Hoechst, DuPont, Amoco, and others, and polyquinoxalines (Tgs greater than 250°C) developed by Hitachi Chemical. The researchers were guided by the presumption that "The first priority for such waveguides should be high thermal stability to provide compatibility with high-performance electronics device fabrication. The fluorinated polyimides have a high glass transition temperature above 335°C , and are thermally stable against the temperatures in IC fabrication processes involving soldering (~270°C)." (T. Matsuura et al., *Elect. Lett.* 29 2107-2108 (1993)).
- The requirements for polymers used in thermo-optic switches are reported by R. Moosburger et al. (*Proc. 21st Eur. Conf. On Opt. Comm.* (ECOC95-Brussels) p. 1063-1066). "Low loss switches at a wavelength of 1.3 μm were fabricated with the commercially available and high temperature stable (Tg>350°C) polymer CYCLOTENE™. . . CYCLOTENE™ was chosen due to its low intrinsic optical loss, thermal stability in excess of 350°C , low moisture uptake and excellent planarisation properties."

The requirements for polymers for polymer passive optical interconnects are reported by DuPont for their Polyguide™ material system in R.T. Chen et al., SPIE

Vol. 3005 (1997) p. 238-251, "High T_g and low coefficient of thermal expansion (CTE) polymers provide thermal-mechanical and environmental robustness and performance stability through their complete domination of the Polyguide™ packaged structure properties." DuPont uses cellulose acetate butyrate (CAB) materials as described in US 5 Patent Nos. 5,292,620 and 5,098,804.

In addition to the acrylate, polyimide, polyquinoline, benzocyclobutene and CAB materials systems mentioned above, other materials systems that have been used to make integrated optical devices include cardo-polymers (C. Wu et al., in *Polymer for Second-Order Nonlinear Optics*, ACS Symposium Series 601, pp. 356-367, 1995), 10 epoxy composites, (C. Olsen, et al., *IEEE Phot. Tech. Lett.* 4, pp. 145-148, 1992), polyalkylsilyne and polysilyne (T. Weidman et al., in *Polymers for Lightwave and Integrated Optics*, Op. Cit. pp. 195-205, 1992), polycarbonate and polystyrene (T. Kaino, in *Polymers for Lightwave and Integrated Optics*, Op. Cit., pp. 1-38, 1992), polyester (A. Nahata et al., *Appl. Phys. Lett.* 64, 3371, 1994), polysiloxane (M. Usui et al., *J. Lightwave Technol.* 15 2338, 1996), and silicone (T. Watanabe et al. *J. Lightwave Technol.* 16 1049-1055, 1998). Poly methyl methacrylate, polystyrene, and polycarbonate have also been used for polymer optical fibers (POFs). Polycarbonate is used as compact disc substrates, 15 and is used in plastic eyeglass lenses, hard contact lenses, and related applications. Silicones are used in flexible contact lenses.

Several researchers have designed optical switching devices using thermal effects in polymers. In addition to the research work of R. Moosburger, Op. Cit., one group has been trying to commercialize thermo-optic switches using a digital optical waveguide switch configuration (G.R. Mohlmann et al., SPIE Vol. 1560 *Nonlinear Optical Properties of Organic Materials IV*, pp. 426-433, 1991). In this work, a resistive heating element is deposited on a high glass transition temperature thermo-optic polymer stack that contains a waveguide y-branch splitter. Activation of a heater electrode 25 produces a decrease in the refractive index under the activated electrode and results in light switching into the waveguide branch that is not activated.

In work with polymers for thermo-optic integrated optical devices leading 30 to the present invention, it has been observed that there are nonlinear responses due to the viscoelastic behavior of the materials. After repetitive switching of a thermo-optic device, for instance, the polymers begin to exhibit a local change in index of refraction

where they were heated, disturbing the "off" state of the switch and its time response. The viscoelastic properties of a polymer determine the mechanical character of the material response to applied heat or other perturbation. These properties control the rate at which applied changes (such as heat, stress, acoustic excitation, etc.) produce time-dependent responses in the material properties (such as evolution of the index of refraction, mechanical strain, etc.). Any truly elastic contribution generally is linear and disappears after the applied change is removed. However, time-dependent elements of the material response are retained within the material after the removal of the applied change and may require minutes to hours for restoration. If the material response results in a degradation of the operating characteristics of a device, that degradation may accumulate over time and result in failure of the device to meet performance specifications.

For optical devices used in communications, such behavior is undesirable because it can degrade the insertion loss, crosstalk immunity and other performance measures that are critical to the bit error rate of the system. Any such factor that changes with time is a problem for telecommunications applications, where reliability and reproducibility are essential, but where a broad range of environmental conditions may be encountered during a service lifetime. To enable effective thermo-optic switching devices, materials should not exhibit any such slow changes in optical properties.

20 SUMMARY OF THE INVENTION

According to the present invention optoelectronic and photonic devices are formed by employing polymer materials that have a lower glass transition temperature (T_g) than the nominal operating temperature. By using such materials, the local or segmental mobility is increased so that local stress is eliminated or minimized on the polymer material, making performance more robust.

The current invention involves use of a polymer in an optical device in an operating temperature range in the region above T_g , where the polymer segments between crosslinks are allowed local freedom of movement; however, large-scale movement of the material may be restricted by the crosslinked structure of the polymer material. The 30 temperature operation point of a device constructed according to the invention is thus preferably distanced from both the viscoelastic region near T_g and from the glassy region below T_g ; such that the device is operated in a region where viscoelastic effects do not

significantly affect the materials system, and time-dependent responses of the polymer are minimized or eliminated. Device operation can thus achieve minimum degradation and show improved performance attributes.

This invention will be better understood upon reference to the following 5 detailed description in connection with the accompanying drawings.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Fig. 1 is a graph illustrating schematically a change in volume as a function of temperature for an amorphous polymer material.

10 Fig. 2 is a graph illustrating schematically the concept of an effective glass transition temperature, where the value of Tg is a function of the rate of the measurement.

Fig. 3 is a perspective view of a Total Internal Reflection (TIR) switch in accordance with the present invention.

15 Fig. 4 is a cross-sectional view along axis 16-18 showing the core layer of the TIR switch of Fig. 3.

Fig. 5 is a timing diagram illustrating the throughput response obtained for a TIR switch over time, during which the switch is activated.

20 Fig. 6 is a timing diagram illustrating impulse response of a prior art TIR switch activated at a first excitation energy by a first pulse and a pulse after 30000 excitations.

Fig. 7 is a timing diagram illustrating impulse response of a prior art TIR switch activated at second, higher excitation energy by a first pulse and a pulse after 30000 excitations.

25 Fig. 8 is a timing diagram illustrating impulse response of a prior art TIR switch activated at a third still higher excitation energy by a first pulse and a pulse after 30000 excitations.

Fig. 9 is a diagram illustrating insertion loss experienced by the prior art TIR switch of Fig. 6-8 and one according to the present invention.

30 Fig. 10 is a diagram illustrating the temperature required for activation of a TIR switch according to the present invention compared to a conventional TIR switch.

Fig. 11. is a perspective view of a Mach-Zehnder modulator in accordance with the present invention.

Fig. 12. is a diagram illustrating how the appearance of a particular form of viscoelastic affect degrades device performance.

Fig. 13. is a perspective view of a Y-branch splitter in accordance with the present invention.

5 Fig. 14. is a diagram showing the power output of a device of the prior art to the device of Fig. 13 after a number of operation cycles.

Fig. 15 is a perspective view of a thermo-optic grating device according to the invention.

10

DESCRIPTION OF THE SPECIFIC EMBODIMENTS

Fig. 1 illustrates schematically the change in volume as a function of temperature for an amorphous polymer material in general. Range A is the glassy range, range B is the rubbery (for a crosslinked material) or melt (non-crosslinked polymer) regime, and range C between range A and range B is the viscoelastic regime.

15

According to the present invention, the region above the glass transition temperature (region B in Fig. 1) in the volume-temperature curve is utilized. In this region, the polymer segments are allowed local freedom of movement. Consequently, repetitive operation enables devices to function with minimal or negligible viscoelastic effects contributing to premature failure/degradation of performance. In the preferred embodiment, large-scale (bulk) movement is restricted by the polymer material's crosslinked structure.

25

The motivation for operating in the region above the glass transition temperature (T_g) is to avoid the negative effects such as induced insertion loss associated with operating in the viscoelastic regime (described above). However, in applications such as integrated optics, localized heating must often be applied to microscopic regions to accomplish switching and other functions. Heating of the materials, even if the net temperature rise does not exceed T_g , has been found to cause long-lived changes in material properties such as index of refraction. These changes become quite pronounced after many cycles of applied heat pulses such as in an optical switch, for example. If the heating is localized, the changes in refractive index are localized, producing undesired optical effects such as increased insertion loss in devices.

30

According to the invention, a new class of optical devices is disclosed with

physical properties qualitatively different from that previously known wherein polymeric optical materials are employed which are characterized by a relationship between the Tg and the range of intended operating temperatures, and specifically wherein the operating temperatures are near or above the Tg of the optical materials. By operating devices near 5 or above the Tg of the optical materials, viscoelastic contributions may be diminished or even removed. If the operating temperature is near (slightly below or at) Tg, the viscoelastic problems may be reduced, and if the operating temperature is above Tg, there should be no accumulation of degradative effects due to viscoelastic contributions. This new type of device can also show improved performance and allow a wider range of 10 operation.

In experiments to measure the glass transition temperature Tg, and the material properties related to Tg as a function of temperature, it has been observed that the rate of change of the temperature during the measurement changes the result. A Tg measured with a slow temperature ramp (Rate 2) is lower than a Tg measured with a fast 15 ramp (Rate 1), as is illustrated in Fig. 2. The rate dependent Tg is sometimes called the effective Tg. For these purposes, Tg shall be assumed to be the value which is measured at a rate of 10°C per minute in a typical commercial DSC (differential scanning calorimetry) machine. However, the heating rate at which a thermo-optic switch of Fig. 3 is operated is much faster than 10°C per minute. The Tg that applies to the operation of 20 the device is the effective Tg at the rate of operation of the device.

In Fig. 2, the concept of a rate dependent Tg is illustrated. Examine first the top curve. The effective glass transition temperature, T_{g1}^{eff} , is defined as the temperature at the intersection 11, 13 of the slopes of the volume-temperature curve. In a real material (non-ideal) the break is not sharp, as is indicated by the dotted lines 15, 17. 25 The place at which the break is observed is a function of rate of change of the temperature; the curve of Rate 1 representing a faster heating or cooling rate; thus the break, or T_{g1}^{eff} , occurs at a higher temperature (i.e. if Rate 1 > Rate 2, $T_{g1}^{eff} > T_{g2}^{eff}$). It is a well-established rule of thumb (see, for example, *Materials Science of Polymers for Engineers* by T. A. Osswald and G. Menges, Hanser Publishers, Munich 1995) that the 30 glass transition temperature changes by roughly 3°C for every order of magnitude change in the rate of the temperature change (McKenna, 1989; or *Viscoelastic Properties of Polymers* by J. D. Ferry, 3rd Edition, Wiley, New York, 1980). The rate is a very

important factor when comparing a thermo-optic device that may swing more than 10°C in one millisecond with a glass transition temperature measured by a DSC at 1°C /min. The difference in rate in this case is about six orders-of-magnitude. According to the rule of thumb, the effective Tg for such a thermo-optic device is about 18°C higher than the 5 Tg measured in the same materials system with a DSC. A very fast thermo-optic switch might have an effective Tg 24°C or so higher than Tg. Even a slow-rise thermo-optic switch with a thermal swing of 3 °C in 100 milliseconds will still have an effective Tg about 9°C larger than the Tg as measured by the DSC at 1°C per minute.

One preferred embodiment of the invention is a thermo-optically 10 controlled optical polymer waveguide TIR (total internal reflection) device 100 as shown in Fig. 3. As a thermo-optic device, or a device that transports optical energy subject to control by thermal means, it functions as a switchable deflector of optical radiation. Transparent polymers are employed to guide the light, namely polymers in which optical 15 radiation propagates with a predetermined minimal amount of attenuation at the intended operating wavelength.

In Fig. 3 a multi-layer stack is constructed , namely several layers formed one on top of the next, in which an optically transparent polymer lower cladding layer 2 lies on a substrate 4. The lower cladding is preferably a polymer deposited by spin-coating. Alternatively, layer 2 can an inorganic or non-crosslinked organic material. Any 20 deposition method known to those skilled in the art would appropriately be selected for deposition of alternative layers. A combination of lithographic definition of photoresist and RIE (reactive ion etching) processes as known in the prior art may be used to fabricate a trench 5 through the lower cladding layer 2. A core layer 6, also spun on, lies above the lower cladding and fills the trench 5. The spinning process produces a film that 25 tends to planarize the surface, filling the trench 5. A third optical layer, the upper cladding 10, is also spun on. As is well known in the art, the thickness of each layer is adjusted by selecting the spinning speed. The layer thicknesses are approximately 5 µm, 1.2 µm, and 1.4 µm, respectively. As fully processed, the materials used in experimental construction of the three layers 4, 6, 10 provided indices of refraction of 1.488, 1.522, and 30 1.422, respectively. With a trench depth of about 0.06 µm and width of 6 µm, single mode guiding at 980 nm was achieved.

The materials used were: a Corning 1734 glass substrate 4, a Gelest UMS-

992 polyacrylate ($T_g \sim 45^\circ\text{C}$) lower cladding 2, a Norland Optical Adhesive 68 ($T_g = 35^\circ\text{C}$) core 6, and a Gelest UMS-182 polyacrylate (T_g below 0°C) upper cladding 10. All three polymer materials are crosslinked by a UV cure step as specified by the manufacturers. These materials were chosen to improve overall dimensional and 5 chemical stability. However, no evidence was found of bulk dimensional or chemical instabilities in devices so constructed.

A waveguide is any structure which permits the propagation of a wave along an optical path, throughout its length despite diffractive effects or curvature of the guide structure. Although the waveguide segment (a predetermined section of waveguide 10 12) shown in Fig. 3 is straight, the waveguide shape can easily be defined into much more complicated structures, if desired. By appropriately fabricating the mask used in defining the photoresist for the etch step, waveguide structures including curves, X- and Y- branches, parallel couplers can be incorporated. An optical waveguide is defined by a length of an extended bounding region of increased index of refraction relative to the 15 surrounding medium. The strength of the guiding, or the confinement, of the wave depends on the wavelength, the index difference and the guide width. Stronger confinement leads generally to narrower modes. A waveguide may support either multiple optical modes or a single mode, depending on the strength of the confinement. In general, an optical mode is distinguished by its electro-magnetic field geometry in two 20 dimensions by its polarization state, and by its wavelength. If the index of refraction change experienced by the optical mode is small enough (e.g. $n = 0.003$) and the dimensions of the guide are narrow enough (e.g. $5.0 \mu\text{m}$), the waveguide will only contain a single transverse mode (the lowest order mode) over a range of wavelengths. For larger refractive index differences and/or larger waveguide physical dimensions, the number of 25 optical modes increases.

Waveguides of this nature are commonly referred to as rib waveguides. Dimensions of the etched trench (rib depth and width) are carefully controlled along with the thickness of the core layer to control the number and shape of propagating modes. Preferably the waveguide is designed to support only a single lowest order mode, 30 eliminating the complexities associated with higher order modes. Higher order modes have different propagation constants than lower order modes, and higher scattering loss, which can be problematic in some applications. In other applications where higher power

is desired, higher order modes might be more beneficial.

In a particular embodiment, a 100 nm layer of 80/20 NiCr is sputtered onto the top cladding layer and etched in its turn by standard lithographic means well known in the art, to form patterned structures such as the heater stripe 8. The control system 19, in 5 this case a temperature control system (current source), controls the thermal excitation element which is the resistive heating element 8. The resistive element is oriented at an oblique angle (a few degrees) to the waveguide channel 5 beneath it. The control element supplies a sufficient amount of current to the heating element via an applicator electrode 9, fabricated as a thin gold layer over an enlarged area at the end of the heating element 8 10 such that the desired operating temperatures can be achieved. The resistive heating element 8 is an exciter since it produces the temperature change in the device in response to an applied current. The control system 19 forms an essential part of the exciter in the sense that it is the control system that generates and controls the current that leads to device operation. The increase of temperature achieved in the switch 100 as a function of 15 time is essentially independent of external factors such as the device temperature, since the heat energy is applied during a short pulse; its time dependence is determined by its diffusion into the device. The resistive heating element 8 is an electrically conductive material such as a metal (in the preferred embodiment nickel-chromium) or other suitably conductive material that is deposited on the upper cladding. Deposition may also be 20 achieved by chemical vapor deposition or other suitable technique for applying such materials. In the case of metallic electrodes, it may be best to incorporate an additional coating deposited below the electrode, to reduce the optical loss which occurs when a portion of the energy in the guided wave mode extends out to the metallic electrode.

The length of the heating element, 800 μm , is made to extend sufficiently 25 before and beyond the region where the heating element passes over the waveguide so that activation of the heating element will produce temperature changes in the polymer that can be sensed by evanescent fields of the mode propagating in the waveguide.

The width of the heating element, about 20 μm , is selected to prevent or substantially reduce optical tunneling of optical radiation through the heated region of the 30 waveguide. Optical tunneling is the coupling of light from a region of high refractive index through a region of lower refractive index to a region of higher refractive index. In general, the optical tunneling length will depend on the wavelength of the guided light,

magnitude of the index change in the heated region, and length of the heated waveguide region.

The return to an equilibrium temperature is accomplished using a cooling element. The cooling element may be any element that assists in the removal of thermal energy by either convection, conduction, or radiation (e.g. thermo-electric cooler, heat-sink, thermal pipe). The cooling element regulates the nominal operating temperature of an element attached to the thermo-optic device. In the preferred embodiment, we use a glass substrate as a cooling element because of the low heat load. Depending on the application, higher thermal conductivity substrates such as ceramic, silicon, or even diamond may be used, and active heat removal steps may be used such as Peltier-effect (TE) coolers, vapor wick coolers, or water cooled or forced air heat exchangers. The effect of these cooling elements is to provide a pathway for the removal of thermal energy so that the device may be operated continuously or intermittently as desired but still remain within an operating temperature.

The operating temperature is the temperature of the polymer layer in the region traversed by the optical path, averaged over a time long compared to the optical response times to changes in the thermal excitation element but short compared to the times for environmental changes outside the device. The operating temperature is preferably controlled to within a desired range as determined by a sensor with a feedback loop to adjust the operation of a heater or cooler to maintain the desired temperature (for example, the minimum operating temperature) at the sensor as is well known in the art. The control loop may include feedforward to prepare for the effects of changes in pulse rate, etc. The minimum operating temperature is the lowest operating temperature allowed by the proper functioning of the device including any thermal control loop, when the ambient environment varies within the temperature, humidity, etc. values specified for device operation.

When the heating element is activated, thermal energy from the heating element diffuses into the surrounding polymer layers and increases the temperature of the polymer while simultaneously lowering the refractive index of the heated polymer via the thermo-optic effect. Polymer regions closer to the heating element experience a larger increase in temperature as a result of absorbing more thermal energy per unit area from the heating element than regions further from the heating element. Fig. 4 schematically

12

shows a top view of the spatial variation in the refractive index in the polymer core layer during switch activation. As illustrated, region 22 for example, which is in proximity to the heating element (not shown) has a refractive index less than region 24 located further from the heating element.

5 If the refractive index change of the heated polymer is large enough and the angle i_4 between the heating element and the waveguide is sufficiently shallow, optical radiation propagating in the waveguide undergoes total internal reflection at the interface 20, called the TIR interface, and optical radiation illustrated as a beam 17 is deflected from the rib waveguide. The deflected radiation 17 is mostly optically confined
10 vertically to the core layer 6, although it propagates within the planar waveguide formed by the core layer outside of the region defined by the trench 5. Light deflected from the waveguide via switch activation may be used, collected, or rerouted using gratings, mirrors, lenses, or by any of several other means known to those skilled in the art which route radiation in or out of the plane defined by the layer 6 (Fig 3).

15 The deflected optical radiation 17 can be used for any number of applications, for example optical beam routers, sensors and modulators. A plurality of heating elements can be placed along a single waveguide to deflect light out of the waveguide at any waveguide-heating element proximity. In addition, a single one or an array of heating elements can be placed above/below an array of waveguides depending
20 upon the application in question.

The optical throughput is measured as the optical power in the beam 18 emerging from the waveguide after traversing the TIR switch 100. As a result of TIR reflection, throughput is decreased upon activation of the heating element. Because the reflected optical radiation of a rib waveguide TIR switch must overcome lateral
25 waveguide confinement, rib waveguide TIR switches may not be as efficient as planar waveguide switches at the same level of excitation. (A planar waveguide switch is fabricated in the same way as described above in reference to Fig. 3, but without fabricating the trench; the input beam is confined in only one dimension, the dimension normal to the plane of the layer 6.)

30 Fig. 5a shows a representation of the waveguide throughput 90 as a function of time. Fig. 5b illustrates that the switch is controlled by a current pulse 92, supplying maximum current to the switch at time t_s and continuing to do so until time t_{sp} .

when it returns to its initial state. As shown in Fig. 5b, a control current pulse is turned on at time t_0 and off at time t_{10} , but the optical response (throughput) of the switch is not instantaneous. Fig. 5c shows the refractive index variation induced at a given depth below the heater element by the delivery of a single thermal energy pulse. The refractive index profile 94 of the polymer material changes as a function of time as a result of the applied current pulse 92. When the refractive index discontinuity experienced by the optical mode rises toward and above the level required for total internal reflection (TIR), light is deflected from the discontinuity, and the throughput drops as shown in Fig. 5a. It can be seen that a predetermined time is required to allow the switch to respond to the heat that has been supplied to it by means of the current pulse, such that the index change will enable switching to occur at time t_{11} , to cause the throughput of the waveguide to fall from a value of T_p to a value of T_A . It can also be seen that a predetermined time is required to allow the switch to relax after the removal of heat, such that the index change of the polymer material enables the reflection to subside and the throughput of the waveguide to rise once again to (or substantially close to) its initial value T_p at time t_{12} . The polymer material as shown requires a longer time to respond to the removal of the heat supply and consequently a longer time for the index of refraction to return to its initial state. The time for the optical throughput to return close to equilibrium is known as the decay time. Here the decay time ($t_{12} - t_{11}$) is longer than the width of the control pulse ($t_{10} - t_0$).

The condition of the switch at a time such that only a predetermined minimum quantity of optical radiation is deflected from the waveguide designed is the "off" state. When the switch is in an "off" state, light propagates the entire length of the waveguide without being substantially perturbed. This condition occurs prior to switch activation and after deactivation. In general the response of the material to the thermal energy delivered by the heating element is limited by the thermal velocity of the heat through the polymer. This means the observed switched light is delayed in time with respect to the flow of electrical current through the heating element, depending on the thermal constants of the polymer layers and physical thickness of the components of the multi-layer stack. When an initially activated switch is deactivated the optical response is retarded in time with respect to cessation of current flow through the heating element.

Switch Fidelity

In order to understand the present invention, it is helpful to review certain properties of polymeric materials. In a linear system, the response of the system to an arbitrary input signal is given by the convolution of the input signal with the impulse response of the system. This system impulse response allows accurate prediction of system performance without having to measure the system response each time the input excitation may be changed. In a polymeric system where the input is from a thermal source, there are conventionally significant contributions from viscoelastic effects which can result in a change of the impulse response of the system, therefore modifying the system response to a specified input signal. In such a case, the actual system response is not equal to the response predicted based on a measurement of the system impulse response, and it is said that the fidelity of reproduction of the desired signal is impaired, or that the system response is distorted. The data illustrated in Figs. 6 through 8 shows changes in the response due to viscoelastic behavior, and as explained hereinbelow is an indication of insertion loss. Specifically Fig. 6 shows optical transmission through a waveguide containing a 2-degree thermo-optic TIR switch when a thermal pulse of 200 pJ/ μm^2 is applied to the heater stripe of dimensions 16 μm wide by 1300 μm long and where the materials were Ablestick L4092 epoxy, Epoxy-lite R46 polyurethane, and Epo-tek UV0134 epoxy, arranged in a triple stack of thickness' 5.0 μm , 1.2 μm and 1.4 μm respectively, counting away from the substrate and operating at about room temperature.

The heat pulse is 20 microseconds long beginning at 100 microseconds. Since the heat pulse is very short compared to the throughput response of the switch, the measured response is essentially equal to the impulse response of the system. At this energy level, the impulse response after 10 minutes of pulsing at 50 Hz (30,000 pulses) is the same as the impulse response after the first pulse. Fig. 6 therefore shows an example of a linear system with good fidelity and low distortion. Fig. 7, taken under the same conditions of Fig. 6 but with the higher thermal pulse energy density level of 350 pJ/ μm^2 , shows that the impulse response is degraded after 30,000 pulses. The waveguide transmission (seen prior to the switch response) is reduced to about 90% of its prior value (insertion loss of about 0.5 dB), and the fall time is degraded to a longer time. Therein the polymer material has been driven above a threshold for initiation of a strong viscoelastic response. The threshold in this waveguide stack therefore lies somewhere between 200 pJ/ μm^2 and 350 pJ/ μm^2 . As used herein, threshold means that for the quantity of interest, there is no

substantial change below the threshold, but a change is observed above the threshold. As a result of the viscoelastic response of the material, the polymer near the switch heater stripe has acquired an index of refraction change or "set" which lasts for a time long compared to the time between switch pulses (20 ms). This index set turns the switch 5 partially "on" where it had previously been completely "off", reflecting about 10% of the light out of the waveguide even in the "off" condition. In addition, the polymer decay time has been slowed by the viscoelastic response to the above-threshold excitation. Fig. 8 with an even higher excitation level of 480 pJ/ μm^2 shows an even more pronounced example of a response dominated by viscoelastic behavior. The insertion loss is now 10 about 1.5 dB, and the signal distortion shows a complex behavior involving both slower response time and multiple time responses.

In the extreme case of Fig. 8, the multiple peaks present in the impulse response indicate that there will be additional frequency components introduced into the switch response to an arbitrary signal, compared to a device operating below the threshold 15 as in Fig. 6. These additional frequency components introduce an undesired distortion into the switch response.

According to the invention, the undesirable behaviors can be substantially reduced or eliminated by maintaining the temperature of the material above T_g, since the behaviors are tied to the viscoelastic response of the materials. The choices are to select 20 optical waveguide materials with T_g below the operating temperature or to raise the operating temperature above the T_g of the materials.

Other characteristics of the switch response regarding its fidelity (e.g. rise time t_r, fall time t_f, activation temperature, and switch dwell time t_d, as illustrated in Fig. 5a, for example) may remain substantially unchanged after repeated cycles of operation 25 under essentially similar operation conditions.

Switch Insertion Loss

According to the invention, use of one or more materials to fabricate the 30 triple stack of Fig. 3 at a temperature above the T_g eliminates or reduces substantially several performance problems associated with the viscoelastic behavior of polymeric materials.

- At a temperature below the T_g or the effective T_g of the material, thermal excitation causes the polymer near the heating element to acquire a persistent refractive index change with respect to the switch cycle time. This unwanted refractive index change may have a variety of undesirable effects. This problem is due to time dependent segmental mobility. The thermal input energy excites the polymer chains away from their previous state. However, after a very short time, the chains reach a quasi-equilibrium (low mobility state) as the temperature drops, but in a potentially different configuration than that experienced previously. This change in chain configuration may lead to changes in density leading to changes in the index of refraction and other material properties.
- 5 Large single pulses or multiple smaller pulses can cause significant changes in the index of refraction of the material. However, we have also found that there is a favorable change in the viscoelastic response of the material as the operating temperature is brought near or above T_g, so that the magnitude of the long time constant refractive index change is reduced (or eliminated, i.e. reduced so far that no effects are seen during the lifetime of
- 10 the device). Some viscoelastic contributions are diminished above the glass transition temperature of crosslinked polymer materials.
- 15

The additional loss observed in traversing an integrated optical device compared to an equal length of unperturbed waveguide is called the active insertion loss of a device. Specifically, referring to Fig. 4, when the switch is on, an input beam along axis 16 that is coupled into the waveguide channel 5 reflects off the TIR interface 20 and propagates out of the waveguide to form a deflected output beam along axis 17. When the switch is off, the input beam of axis 16 should propagate through the interface and continue along the waveguide to form an undeflected output beam along axis 18. Before switch activation, because the index difference at the TIR interface is low, the reflection 20 in the off state is preferably very low. An "off" switch is preferably essentially invisible to light propagation in the waveguide, producing extremely low loss in the input guide. Low insertion loss is especially desirable when the input waveguide is a bus with many switches. The TIR switch region in the off-state may have negligible insertion loss when first fabricated, but the long time constant index of refraction change that occurs as a 25 result of the thermal excitation can significantly increase the insertion loss.

In one experiment, a core material is used having a T_g that is nearly 120°C above the operating temperature. A TIR switch angled at 2 degrees from the waveguide

axis was fabricated from an Ablestick L4092 epoxy lower cladding layer ($T_g = 53^\circ\text{C}$), an Epoxy-lite R46 polyurethane core layer ($T_g = 150^\circ\text{C}$), and an Epo-tek UV0134 epoxy top cladding layer ($T_g = 148^\circ\text{C}$), of thicknesses of 5 μm , 1.2 μm and 1.4 μm , respectively, on a glass substrate. Figs. 6-8 show the measured variation in throughput as a function of time for this switch activated with energies of 200, 350, and 480 $\text{pJ}/\mu\text{m}^2$, respectively.

Specifically Fig. 6 shows the waveguide throughput for the first cycle of operation of a switch that is activated with an energy of 200 $\text{pJ}/\mu\text{m}^2$ and the waveguide throughput after the same switch is cycled for 10 minutes at 50 Hz (30,000 pulses). After 10 minutes of pulsing, the response of the TIR-switched waveguide is substantially equal to its response during the first cycle of operation. From this data we conclude that this energy density is below the threshold of degradation resulting from viscoelastic response of the material.

Fig. 7 shows the waveguide throughput of a TIR switched waveguide activated with an energy of 350 $\text{pJ}/\mu\text{m}^2$, a level at which the onset of degradation resulting from viscoelastic response occurs. After 10 minutes of cycling at 50 Hz the waveguide throughput, TP_K , (measured approximately 100 μsec prior to switch activation) decreased compared to the throughput measured prior to the first pulse, TP_I . This difference in waveguide throughput is insertion loss which has been induced by thermal cycling. The additional loss is due to a long-lived change in index induced in the region of the heating element, that we attribute to the viscoelastic response of the polymer. Fig. 8 shows the waveguide throughput of a similar TIR switch that is activated with an even higher energy 480 $\text{pJ}/\mu\text{m}^2$ which consequently creates a larger insertion loss (~26% after 30,000 pulses).

Fig. 9 is a replot of the insertion loss calculated from Figs. 6-8, as a function of the switch energy density. As shown, prior to switch activation at a certain energy the insertion loss is negligible. Above a certain switch energy density M near 200 $\text{pJ}/\mu\text{m}^2$ the observed insertion loss increases with switch activation energy. The energy at which the observable insertion loss increases with switch activation is the onset or threshold M of degradation resulting from viscoelastic effects. The threshold of degradation resulting from viscoelastic response is related at least to the quantities of time, temperature, and energy.

Trace K of Fig. 9 shows the measured insertion loss of a TIR switch incorporating the preferred, lower Tg polymer described above in reference to Fig. 3. The onset for the threshold of degradation resulting from viscoelastic effects occurs at a substantially higher energy N near $400 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$. The higher threshold of Fig. 9 results in negligible changes in the index of refraction over an operating lifetime of a device operating at a point sufficiently below threshold such as $250 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$. At this operating point, conventional devices made with high Tg materials will fail (i.e. show measurable changes in the index of refraction over an operating lifetime). We achieved this improvement in performance by reducing the Tg of the top cladding substantially below the operating temperature of the device, and by reducing the Tg of the core down to the neighborhood of the operating temperature. In our single pulse data, it should be noted that the operating temperature is room temperature, 23°C . In our multiple pulse data, the operating temperature is elevated somewhat above room temperature, decreasing the time-dependent viscoelastic contribution to the observed response, reducing the long time constant change in the index of refraction. It is expected that there will be a temperature rise in the range of $0\text{--}50^\circ\text{C}$ above room temperature, for 50 Hz operation, with pulse energy densities from $200 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ to $1000 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$. In the multipulse data, we are therefore operating the top cladding layer at least 33°C above its Tg. From the time dependence of our switch response our effective Tg is about 21°C above Tg, so the cladding layer is operating at least 11°C above its effective Tg. We are operating the core layer about 2°C below Tg and about 23°C below its effective Tg. The lower cladding is operated about 12°C below Tg and about 33°C below its effective Tg.

The top cladding material experiences the highest temperature changes in the inventive device where it is directly adjacent the heater stripe. The core layer and the lower cladding layers experience lower temperature excursions because of thermal diffusion. For this reason, the Tg of the top cladding should be well below the operating temperature. Doing this results in the marked improvement represented in Fig. 9. Further improvements can be obtained by lowering the Tg of the core and the lower cladding materials. It is expected that long-time-constant index changes should be minimized or eliminated in the top cladding since the materials exhibit no or minimal viscoelastic response at the operating temperature is above Tg. The threshold observed in Fig. 9 is related to contributions from the core and/or bottom cladding layers. The best mode is to

provide core and lower cladding materials having an effective Tg below the operating temperature of the device. Using the rule of thumb described below, if the operating temperature is kept 20°C above the Tg or the effective Tg, no viscoelastic effects are expected to appear.

- 5 The glass transition temperature of the materials is preferably lowest in the upper cladding and highest in the lower cladding. This arrangement allows any stress (mechanical or fabrication related) or related perturbation generated by the thermal switching pulse to be readily transported through the stack and transported away from the region where switching occurs and light is guided. Energy is dissipated most efficiently
10 in materials with high mobility (and low glass transition temperatures), thus as perturbations propagate through the stack, stress and other forces are driven toward the lower cladding.

The viscoelastic regime (C) in Fig. 1, lies between the elastic (B) and the plastic (A) regimes. Viscoelasticity is defined as the deformation of a polymer specimen
15 which is fully or partially reversible but time-dependent, and which associated with the distortion of polymer chains through activated local motion involving rotation around chemical bonds or related phenomena. Viscoelastic effects, usually observed in a temperature band near and below Tg, are demonstrated by a time-dependent response of the polymeric material. The materials are significantly influenced by the rate of straining or heating. For example, the longer the time to reach the final value of stress at a constant
20 rate of stressing, the larger is the corresponding strain. The exact boundaries of the viscoelastic regime are poorly defined and application-dependent. A common rule of thumb is that viscoelastic effects are observed over common experimental time scales within a range of 20°C below to 20°C above the glass transition temperature. The exact
25 range of temperatures is a function of the polymer chemistry, sample geometry, and the rate of change of the temperature during the experiment or the operation. Viscoelastic effects have been observed as far as 120°C below Tg. For a complete discussion, see the book by Ferry referenced earlier. For the purposes of this document, the term viscoelastic will encompass both linear and nonlinear responses of the material involving molecular motion.
30 Since thermal excitations induce molecular motions, viscoelastic responses are of particular concern in thermo-optic devices.

In the selection of materials for the construction of thermo optic devices,

rate sensitivity should be observed as described in relation to Fig. 2. For a material to remain unaffected by viscoelastic contributions, its glass transition temperature would need to lie an additional amount lower than the T_g, for rapidly cycled devices. This effect is thus more significant the greater the rate or the shorter the active or "on" time under which the device operates. For example, a nanosecond pulse device would have about a ten order of magnitude rate effect, or a 30°C increase in the effective glass transition temperature compared to T_g. The terminology of a "bulk" or "large-scale (macroscopic)" glass transition temperature will be used to describe a glass transition temperature measured in a slow manner (such as dilatometry). This is the type of glass transition often found in handbooks and literature; usually, if no rate information is presented with the glass transition data, the implication is that the data was measured sufficiently slowly to reflect the bulk or equilibrium-like properties.

If a device employs a polymer with a bulk or quasi-equilibrium glass transition temperature of 60°C and operated such that switching occurred on the microsecond time scale (seven orders of magnitude rate effect change), the effective glass transition would be about 80°C. The measured dn/dT using a quasi-equilibrium method shows that dn/dT increases above about 60°C (as shown in Fig. 1) and thus one may conclude that a device operating above 60°C should show an enhanced thermo-optic effect. However, the device operating temperature would have to be raised above about 80°C to see this enhancement in a rapidly switched device.

Operating a device above the glass transition temperature is potentially a problem. Non-crosslinked materials lose dimensional stability above T_g and thus flow. This problem may be resolved in practice by surrounding the material with rigid structures that contain the material, maintain its shape, and prevent it from flowing. Or, the problem may be resolved without use of surrounding structures by crosslinking the material such as in sol-gels, crosslinked polymers, etc. A crosslinked polymer is defined as a network formed by a multifunctional monomer/polymer. In a loosely-crosslinked material, local freedom of motion associated with small-scale motion of chain movement of chain segments is retained, but large-scale movement (flow) is prevented by the restraint of a diffuse network structure. The crosslinked network extending throughout the final article is stable to heat and cannot be made to flow or melt under conditions that linear polymers will flow or melt. Glass transitions as low as minus 100°C have been

readily achieved in crosslinked systems; the presence of a glass transition indicates that the polymer chains retain moderate to high local mobility while the crosslinks prevent flow. By operating optical devices made by crosslinked polymer materials in this regime, the favorable viscoelastic behavior may be exploited without losing dimensional stability.

- 5 The chemical stability of crosslinked materials is also generally enhanced over non-crosslinked materials. For example, lower solvent penetration minimizes solubility, and greater functionality limits residual reactive sites that could cause decomposition or degradation during use, and cycling materials leads to stable water and solvent absorption.

Viscoelastic effects contribute to the degradation of optical switching devices by, for example, causing changes in optical throughput of the waveguide with time as described above, and/or affecting the rise, fall and dwell times of the switch. Viscoelastic effects can restrict the operating range of a device and limit both the application specifications and additionally limit the stability and lifetime of the device. In order to build and operate successful optical devices, viscoelastic effects must be minimized or eliminated under the device operating conditions. Viscoelastic effects that lead to permanent (or persistent) variation of the material properties of the core or cladding layers may also contribute to failure modes such as switch insertion loss. Other degradation mechanisms that need be considered include fatigue, creep and aging.

Fatigue occurs in structures subjected to dynamic and fluctuating stresses (similar to those experienced in the repeated thermal cycling of the thermo-optic polymeric devices). The fatigue limit and fatigue life are greater for crosslinked polymers as compared to those that are not crosslinked. Both fatigue and creep (slow continuous deformation) are minimized or eliminated in elastic, crosslinked polymers.

Thermal history is an important parameter in determining viscoelastic and thermomechanical behavior. For example, in quenching amorphous polymers from above T_g, the free volume or local mobility is increased, which facilitates relaxation and recovery. Annealing the polymer below T_g decreases free volume and enthalpy, increasing the yield stress and decreasing fracture toughness. (This phenomenon, known as aging, is well described in the polymer research literature; see for example *Physical Aging of Polymers* by John M. Hutchinson, *Prog. Polym. Sci.*, Vol. 20, 703-760, 1995). Aging refers to changes in the polymer properties with time, including embrittlement, changes in index, changes in density, and other factors that will cause optical device

degradation.

Other factors which cause performance degradation include mechanical stress relaxation and processing induced residual stresses which can cause refractive index changes in the material that may degrade device performance efficiency, e.g. switch 5 efficiency. When polymer films are laid down onto substrates, the deposition processes may induce stresses in the film which remain to a degree as residual stresses after completion of all the process steps involved in fabricating a part. These stresses should be different in the direction in the plane of the surface of the substrate, as compared to in the direction normal to the plane of the substrate. Since stresses generally produce a 10 change in the optical index of refraction, such differential stresses produce slightly different index values for TE and TM optical polarization (in the plane and normal to the plane, respectively). As a result, the polymer film is birefringent. By operating a device above the Tg of one of more of the films, this birefringence is minimized. Above the Tg, the polymer chains acquire a degree of freedom of motion (limited by their viscoelastic 15 properties, the amount of allowed motion depending upon the properties of the polymer such as the chain rigidity and the crosslink density) which allows the material to relax under the applied strain. The relaxation effectively reduces the birefringence. A reduction in birefringence is desirable for many optical devices.

Gratings, which are discussed in more detail later, are particularly 20 sensitive to birefringence because the two polarizations which may be propagating in the waveguide that transits the grating experience different index of refraction. The resonant frequency of the grating. (The highest peak of the grating spectrum) depends on the index of refraction, so gratings fabricated in birefringent films will exhibit a frequency dependence that is different for the two polarizations. Operating such devices above the 25 Tg to exploit the high mobility relaxation therefore significantly improves their performance characteristics (reducing their polarization dependence).

In general, the benefits of using a optical material system with at least one crosslinked transparent polymer with an effective glass transition below the operating temperature may be exemplified in part as follows: By operating above the viscoelastic 30 regime, thermal cycling will not lead to time-dependent responses such as increased cycle time and switch insertion loss resulting from thermally-induced materials changes such as density drift, index of refraction changes, volumetric evolution, and thermal stress build-

up. Additionally, the device may be operated over a significantly broader range of application temperatures/service temperatures without fatigue, embrittlement, cracking, and crazing. This enhances the device performance and commercial viability of a given device technology. The reproducibility of the information obtained from a device as 5 embodied in this invention is also enhanced, since time-dependent effects are minimized or eliminated.

As indicated above, viscoelastic effects can restrict the operating temperature range of a device, and limit both the application specifications and the stability and lifetime of the device. If viscoelastic effects on all time scales of interest to 10 the device during operation and use can be avoided, it will provide a time-independent device which can be reproducible, stable, and robust to operation. The present invention addresses the need to provide optoelectronic and photonic devices that are less affected by viscoelastic effects.

Degradation in material properties from viscoelastic effects may lead to a 15 variety of failure mechanisms. Viscoelastic effects are the result of time dependent rearrangements of the polymer segments which are long on the time scale of the perturbation applied. In order to compete effectively in the marketplace advances in both performance and reliability must be achieved. Degradation in material properties from viscoelastic effects include failure mechanisms relating to changes in density, volume, 20 thermal (thermal conductivity, coefficient of thermal expansion), mechanical (stress relaxation, modulus), electrical (dielectric constant), magnetic (susceptibility), optical (index of refraction, loss), chemical (solvent stability, environmental stability) and processing (residual stress, manufacturability) characteristics. Note that the degradation resulting from viscoelastic effects listed above may occur independently, sequentially, or 25 in combination whether or not they are observed over the time scales of measurement.

The device fabricated in this embodiment using the materials described above will have a multiplicity of benefits that can be obtained by exploiting the viscoelastic properties of the materials above Tg. These benefits include but are not limited to, an enhanced thermo-optic coefficient, improved switching efficiency, reduced 30 energy consumption, faster switch response time, improved cycle time, extended operational lifetimes and switch fidelity, reduced creep, linearity of index of refraction as a function of temperature, and reduced birefringence.

Enhanced thermo-optic coefficient

Larger dn/dT values, specifically for TIR switches, enable lower operating temperatures to be utilized. Therefore to exploit lower design temperatures, it is desirable to fabricate devices using polymers with larger thermo-optic coefficients. The vertical axis of Fig. 1 is related by a multiplicative constant to the index of refraction of the material. It follows that larger values of dn/dT can be obtained by operating above Tg. We measured dn/dt values of several polymers as a function of Tg. In Table 1 below, values of dn/dT are listed for several polymers, which results have been obtained by either the inventors or were reported in R.S. Moshrefzadeh, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 10, 5 April 1992, pp. 423-425. Polystyrene (PS), poly(methyl methacrylate) (PMMA), polycarbonate (PC), polyimide (PI) and polyurethane are high Tg ($T_g > 100^\circ\text{C}$) linear polymers (thermoplastics), Norland 61, Norland 68, are crosslinked epoxies with Tgs of about 100°C and 35°C respectively. We have observed thermo-optic coefficients that are two to three times higher in lightly crosslinked lower Tg materials as compared to higher 10 Tg linear and crosslinked materials.

Table 1

| Material | dn/dT ($\times 10^{-4}$) [$1/\text{ }^\circ\text{C}$] | Tg [$^\circ\text{C}$] |
|--------------|---|-------------------------|
| Polyimide | -1.5 | 250 |
| Polyurethane | -1.4 | 150 |
| 20 PC/MA | -1.3 | 130 |
| PS | -0.83 | 100 |
| PMMA | -1.1 | 100 |
| Norland 61 | -2.6 | 80 |
| Norland 68 | -3.1 | 35 |

25

Using the Norland crosslinked polymers, higher values of dn/dT were obtained because of enhanced local mobility of the polymer chains at the operating condition; the lower glass transition implies higher mobility for this experiment. The data in Table 1 suggests that further enhancements in the thermo-optic coefficients may be 30 realized by further reducing the Tg of the polymer below the operating temperature.

Switching Efficiency

Using materials from the family described above, increased switching efficiency may be obtained compared to similar devices fabricated using high Tg materials operated under identical conditions (same wavelength, switch energy, etc.). The increased switching efficiency results from the lower switch activation energy required to induce the same refractive index difference at the TIR interface.

In the above example the TIR switch is designed to operate in a temperature range such that a predetermined minimum quantity of optical radiation is deflected from the waveguide, depending upon application and field of use. Switching efficiency is determined by first measuring the waveguide throughput, T_p , before device activation and then during switch activation, T_A . The switch efficiency is calculated using the expression $\text{eff} = 1 - T_A / T_p$. Switching efficiency refers to the maximum amount of optical radiation deflected from the waveguide when a switch is activated under repetitive pulsing at 50Hz compared to the throughput of the waveguide when the switch is in the "off" state.

Table 2 lists the results of switch efficiency measurements on devices containing thermo-optic TIR switches that were operated at temperatures near 23°C. Device 1 was a 2-degree thermo-optic switch comprising the high Tg materials set described above (Epo-tek/Epoxy-lite/Ablestick) on a glass substrate. Device 2 is a preferred embodiment fabricated with lower Tg materials (Gelest/Norland/Gelest) on glass with nominally the same switch geometry and layer thicknesses. In all measurements, essentially similar TIR switches were activated with a current pulse that delivered $200\text{pJ}/\mu\text{m}^2$ of energy to the heating element and the switch efficiency was measured as described earlier. As Table 2 shows, devices that incorporated our lower Tg material system had much improved switch efficiencies. The switch efficiency increased from near 0% to approximately 80% when the thermo-optic coefficient of the core layer was changed from -1.4×10^{-4} [1/C] to -3.3×10^{-4} [1/C]. These results show that the switch efficiency can be improved by operating the device near or above the glass transition temperature of the polymers used in the optical waveguide.

Table 2

| | Core Layer | Tg | Switch efficiency at 200 pJ/ μm^2 |
|---|-------------------------|--------|--|
| 5 | Device 1 Epoxy-Lite R46 | +150°C | ~ 0% |
| 5 | Device 2 Norland 68 | +35 °C | 80% |

Although we used room temperature devices, the same effect of using a using a lower Tg/higher mobility polymer can be achieved with higher Tg materials by heating the device to operate at a nominal operating temperature that equals or exceeds 10 the Tg or the effective Tg.

Switch Energy Consumption

The device fabricated in this embodiment requires the control element to deliver less electrical energy to the switch element since larger thermo-optic coefficients 15 enable lower operation temperatures to achieve the same or perhaps better switch efficiency than similar devices fabricated using higher Tg materials. To illustrate this point further we tested Device 1 and Device 2 as described above, by measuring the amount of electrical energy that produced a predetermined switch efficiency of ~80% in each of the devices. Table 3 lists the electrical energy supplied to the TIR heating 20 element to achieve nearly 80% switch efficiency. The data in Table 3 indicates that devices incorporating material layers with larger thermo-optic coefficients required less electrical energy to achieve similar switch efficiency than devices comprised of higher Tg materials. Again, these results show that the switch energy consumption can be reduced 25 by operating the device near or above the glass transition temperature of the polymers used in the optical waveguide.

Table 3

| | Core Layer | Tg | Energy for 80% switch efficiency |
|----|-------------------------|--------|----------------------------------|
| 30 | Device 1 Epoxy-Lite R46 | +150°C | > 450 pJ/ μm^2 |
| 30 | Device 2 Norland 68 | +35°C | 200 pJ/ μm^2 |

Switch Cycle Time

The device fabricated in this embodiment produces a faster switch for a given heating rate since lower minimum operating temperatures are necessary to achieve 5 the refractive index differential to achieve TIR switch activation. Fig. 10 shows temperature responses for two different polymer TIR switches. Trace A illustrates the temperature response of a device incorporating a high mobility/lower Tg/large dn/dT polymer that is operated at a temperature to achieve TIR switch activation. The switch reaches the activation temperature, T_A , enabling TIR switching to occur at a time t_1 . After 10 the switch has been deactivated the temperature returns to equilibrium, a value T_E , close to its original temperature at a time t_2 . The switch "cycle time" for this high mobility/lower Tg/larger dn/dT polymer switch is ($t_2 - t_1$).

Trace B illustrates a device incorporating a higher Tg polymer switch that is operated at a temperature to achieve TIR. After a larger application of thermal energy 15 than for the switch of Trace A, the switch of Trace B reaches the activation temperature, T_B , enabling TIR switching to occur at a time t_3 , later than the time t_1 . After the switch has been deactivated, the temperature returns to equilibrium, T_E , a temperature close to its 20 original temperature at a time t_4 and consequently the refractive index of the polymer material reverts to its equilibrium state. The switch cycle time for this higher Tg polymer switch is ($t_4 - t_1$). Note that it takes longer to return to a temperature near equilibrium from a higher temperature than it does from a lower temperature, thus increasing the switch cycle time. The switch cycle time can be improved by operating the device near or above 25 the glass transition temperature of the polymers used in the optical waveguide.

Note that the benefits described above may occur independently, 25 sequentially, or in combination whether or not they are observable in a specific device.

Many variations in implementation apply to this invention. Most importantly, any material known in the art with a glass transition temperature may be used for the waveguide materials, including urethanes, siloxanes, acrylates, fluoroelastomers, alkenes, dienes, acrylates, methacrylic acids, methacrylic acid esters, vinyl 30 ethers, vinyl esters, oxides, and esters or perhaps other polymers that possess tailorable Tg's, and optical transparency. These materials may be combined with other materials known in the art including glass, polymer, semiconductor, sol-gel, aero-gel, and/or metal,

to form the desired waveguiding structure, provided that at least one of the materials in the waveguiding structure (i.e. traversed by at least an evanescent field of optical radiation) is a polymer operated above T_g.

- Other types of waveguiding structures known in the art can be used,
- 5 including ridge waveguides fabricated into the core rather than the lower cladding, patterned waveguides formed from four-layer (or more) stacks, cladding-loaded waveguides, buried waveguides, diffused waveguides, photodefined waveguides, bleached or poled waveguides, serial grafted guiding structures, etc., provided that a local index enhancement is produced within the boundaries of the desired guided mode pattern.
 - 10 The local index enhancement may be symmetric or asymmetric relative to the center of the waveguide, and different combinations of refractive indexes may be used as is known in the art. Patterning techniques known in the art that can be used include wet etching, in- or out-diffusion, liftoff, laser ablation, focused ion beam processing, etc. Coating techniques known in the art that can be used include spinning, extrusion, slot-die,
 - 15 evaporation or vapor phase deposition, meniscus coating, lamination, etc. Substrates may be chosen from among many known in the art including glass, silicon, metal, semiconductor, polymer, etc.

- Other resistive films known in the art may also be chosen, including NiCr, WSi, SiN, other metals and compounds, and various other forms of silicon such as
- 20 amorphous silicon, and all these films may be doped with other species to improve their properties, provided that the resistivity obtained with the film is adequate for heating the waveguide in the thermo-optic region. The resistive film pattern may or may not include electrode structures made of other materials such as conductive polymers, metals including Al, Cu, Pd, solder, etc., but these connection structures are preferably made of a
 - 25 high conductivity material that enhances the connection process to the external electronic leads that should be connected to the control element with low contact resistance.

- Other switch elements (including Y-branch switches, crossing waveguides, parallel couplers, gratings, electro-optic and electro-strictive devices, etc.) could be used in place of the TIR switch. It will be apparent to those of ordinary skill in the art that
- 30 certain modifications well known in the art will be required to enable the alternative devices to operate as desired. For example, in an electro-optic grating which requires the use of an electro-optic polymer layer as compared to the thermo-optic polymer layer in

- the example above, the control element would be in the form of a voltage supply. Supplying voltage to an electrode placed over the waveguide in a similar fashion to the resistive heating element described above creates an electric field in the electro-optic polymer layer, and changes its refractive index through the electro-optic effect.
- 5 Ultimately switch activation will cause the deflection of light from the waveguide as in the previous example. However, double crosslinking of the chromophores will be desirable to maintain their orientation when operating the materials above their Tg to exploit the favorable viscoelastic properties. In some applications it may be advantageous to deposit additional layers (e.g. for heaters, for hermetic layers, opaque 10 layers, etc.) as device and material requirements necessitate.

The TIR switch is an example of a controller that controls the propagation of optical radiation in a transparent material. Other examples include Mach-Zehnder modulators, Y-branch splitters, gratings, parallel couplers, and many others including in general thermo-optic, electro-optic, and acousto-optic devices and devices actuated by 15 applied stress or strain.

These alternatives may be combined with any of the devices or implementations of our invention described herein, repeated units may be fabricated, and parts of one device described here may be integrated with all or parts of other devices described here, or known in the prior art.

20

Mach-Zehnder Modulator

An illustration of a thermo-optic Mach-Zehnder modulator is shown in Fig. 11. This figure shows a three-dimensional rendering of a multi-layer stack comprised of a lower cladding layer 32, a crosslinked polymer waveguide core layer 34, 25 into which a waveguiding structure has been defined by one of many means described earlier, and a crosslinked polymer top cladding layer 36. The core layer contains input and output waveguides, 38 and 40 respectively, input and output y-branches, 42 and 44 respectively, bias and a signal waveguides, arms 46 and 48. Located over the bias and signal waveguides on top of the multi-layer stack are two resistive heating elements, one 30 of which serves as a bias heating element 50 and the other as the modulating heating element 52. There are control elements 56 and 54 to individually supply current to the bias heating element and modulating heating element respectively.

In this optical device, light enters through an input waveguide 38 where it is then split in the input y-branch and propagates into the bias and the signal waveguides. In the absence of any control current to the heating elements, light propagating in bias and signal waveguides are recombined at the output y-branch and interfere constructively 5 or destructively according to the relative phases and finally exit the device through the output waveguide 40.

The control current supplied to the bias heating element is adjusted to change the temperature T_{bias} and hence the steady state refractive index of the polymer in the proximity of the bias heating element $n_1(T_{bias})$. The refractive index change caused 10 by the thermo-optic effect changes the optical path length of the light in proximity to the bias heating element such that the optical phase difference between the two arms of the interferometer is nearly $\pm\pi/4$ and a half-maximum optical intensity is observed at the output waveguide. A modulated control current is then applied to the modulating heating element. Since the device is biased at the half-maximum intensity location, subsequent 15 device output will be proportional to the applied driving current for small modulation currents. Changes in the control current will result in time dependent optical response.

The optimum performance of this device under repetitive cycling of the modulating current requires a polymer material that returns to equilibrium or near equilibrium when the modulating control current is turned-off and minimal drift of the 20 refractive index of the polymer near the bias heating element. If the material properties of the polymer, for example the refractive index, density, or volume in proximity to the heating elements evolve with time, the required bias temperature to achieve $\pi/4$ optical phase shift will differ from the originally designed temperature. When operating such devices below the T_g of the optical materials as in the prior art, differential index changes 25 can build up that unbalance the phase of the two beams in the output 40 and device performance will degrade. This degradation may be partially compensated by changing the bias temperature controlled by the heating and control elements 50 and 56, but in practice a drift in the bias temperature usually requires additional hybrid feedback or tracking electronics. For device simplicity and cost concerns, it is desirable to have 30 devices that function normally without additional control electronics.

Fig. 12 illustrates how changes in the bias temperature affect the intensity of the output light. The figure shows the output signal intensity as a function of bias

waveguide temperature (T_{bias}) plotted as a solid line and indicates the temperature at which the interferometer is originally biased at T_1 . If the material properties change due to viscoelastic material response, the optical response of the device will also change so that a different temperature, T_2 , is now required to attain the same $\pi/4$ phase shift (dotted line on the figure). A device designed to operate with a bias temperature T_1 no longer functions as intended. Furthermore, if the guide properties of either arm of the interferometer change with respect to the other (as by changes in density due to the viscoelastic response), the splitting of light at the input y-branch will be unbalanced and the contrast ratio of the interferometer will decrease in time.

10

For the device to operate with negligible decrease in contrast ratio and at the temperature intended without additional control electronics, it is desirable to utilize materials with negligible viscoelastic response. A device comprised of lower T_g material would be less effected by viscoelastic effects and as such would function more reliably than devices comprised of materials exhibiting observable viscoelastic responses.

Y-branch Splitter

Fig. 13 shows a top view of a three-layer stack comprising a lower cladding layer 60, a crosslinked polymer waveguide core layer 62 (into which waveguide structure has been defined by means described earlier), and a crosslinked polymer top cladding layer 64. The core layer contains an input waveguide 66, and two output waveguides 68 and 70, with an angle of separation 72 between them. Located on the stack are two resistive heating elements 74, 76 which lie approximately over the output waveguides and have nearly the same width. Each switching element is powered by a current supply 80, 82 so that either electrode can be individually activated. The figure also shows a waveguide branch where the single input waveguide splits into the two output waveguides at 78. The heating elements are offset from the branching section to allow a gradual heating (as viewed along the axis of one branch of the waveguide as compared to the other (deactivated side)).

20

A heating element increases the temperature of the polymer material near it, and lowers the effective refractive index of output waveguide under the activated heating element compared to the unheated output waveguide as a result of the thermo-

optic effect. Light will preferentially couple into the output waveguide with the higher effective refractive index as is well known in the art. Such a design produces an adiabatic thermal heating of a region in proximity to the activated heating element. Without any current applied, light entering the branch from the input waveguide is split between output 5 waveguides.

Such devices that operate at temperatures near or below the effective T_g are inherently susceptible to changes in material properties from viscoelastic effects. For example, consider the case of a permanent change of the refractive index in polymer material of one of the output waveguides compared to the other as a result of viscoelastic 10 effects. If the refractive index of polymer material under the heating element of either waveguide evolves with repeated switch operation, failure in the form of preferential routing of light into the waveguide with a higher refractive index will occur, even in the absence of a control current to the heating element.

Fig. 14 illustrates the Y-branch degradation mode of a splitter utilizing 15 high T_g polymer material(s). The figure shows an example of the optical power in each output waveguide after the completion of a given number of operation cycles of switch 76. Initially, the Y-branch equally distributes power into both output waveguides, by design. As the number of cycles increases, viscoelastic effects cause a long time constant 20 refractive index change, and the branching symmetry is broken. Eventually a state may be reached when the splitting of light into the output waveguides is highly asymmetric when neither heating element is activated, and the device no longer functions as the desired EDB splitter in the off-state. We have shown the evolution to be linear, but the detailed temporal form of the throughput change in a given application depends on both 25 the materials used, the pattern of arrival of switching control signals.

As stated earlier, if a substantially permanent index of refraction change occurs in the polymer material under a heating element (76), light will preferentially route 30 into the waveguide with the higher refractive index (68). In order to route light into output waveguide (70) a higher current would be required to overcome the preferential routing caused by damage (the degradation in material properties) to output waveguide 70. If the cycle is repeated, excess damage will be incurred in each cycle. The failure mechanisms described above will be reduced or eliminated if the device is fabricated

using lower T_g polymer materials enabling operation above the T_g of the polymer material(s).

Thermo-optic Grating Devices

- 5 In practical devices, it is desirable for the device to respond linearly to the application of a control signal. This property is desirable because it simplifies device electronics that control and monitor performance compared to systems that possess a nonlinear response which then require complex algorithms to relate device control signals to device response. In addition, response linearity allows uncomplicated adjustment, 10 tuning, and control of device operation because signal and response are related by a simple derivative relationship and device performance can be predicted if the control signal is known.

15 Thermo-optic devices operated in the spirit of this invention, comprise materials with T_g below the operating temperature of the device and therefore naturally operate in a regime where the refractive index of the polymer reasonably changes linearly with temperature (see region B of Fig. 1).

- 20 In contrast, devices comprised of materials with T_g above the operating temperature will experience a change in the slope of the thermo-optic coefficient as the temperature of the device is raised above T_g. This change in slope produces a nonlinear response of the index of refraction to the applied control signal (temperature). Note that devices operated at temperatures well below T_g (see region A of Fig. 1) also exhibit a linear relationship between refractive index and temperature, but these devices operate with a lower thermo-optic coefficient than devices operating at a temperature above T_g, and they experience the unfavorable viscoelastic effects described above such as long- 25 time constant change in the index of refraction which may unbalance a device or increase its insertion loss.

Elements capable of being regulated to attain a desired temperature or index of refraction include devices such as gratings as shown in Fig. 15. Polymer thermo-optic grating devices may be used as optical filters, add/drop multiplexers, or more generally as thermo-optically tunable Bragg gratings. Desirable properties include long-term stability of index of refraction, a large material thermo-optic coefficient, linearity of response as a function of temperature, and lack of birefringence. All of these properties are uniquely obtained with optical polymer waveguide materials operated above their Tg, and preferably above their effective Tg.

Consider a Bragg grating formed by fabricating a polymer multi-layer stack consisting of a lower cladding 94, core 100, and upper cladding 92, on a substrate 96. The core layer contains a waveguide (as described earlier) where the optical mode in the waveguide 102 now overlaps a region containing a grating 104. The grating may be fabricated by one of several methods known in the art including etching, ablation, molding, embossing, lamination, e-beam writing, holographic exposure, etc., provided that the process provides adequate modulation of the index of refraction with the desired periodicity. The grating period (typically on the order of the wavelength of light) is selected to achieve Bragg reflection for at least a predetermined wavelength of light 98 propagating in or coupled into the waveguide. Light of wavelength satisfying the Bragg condition is reflected or coupled into another path. In a preferred embodiment, the grating retro-reflects light in the waveguide.

The Bragg waveguide reflector can be made thermally tunable by fabricating a heating electrode 106 on the device in proximity to the grating element. When a control element 110 delivers current to the heating element the temperature of the polymer (grating) in proximity to the heater will change as a result of the thermo-optic effect. The refractive index change of the grating affects the wavelength of light that satisfies the Bragg condition so that a different wavelength is now Bragg reflected in the waveguide. If the process is repeated at another temperature another wavelength will then satisfy the Bragg reflection condition. In this manner the device is tunable because a temperature can be selected to achieve Bragg reflection at many predetermined wavelengths. It should be noted that this device is usually operated in a steady state temperature condition so that a single wavelength will satisfy the Bragg reflection condition over a given time interval. A linear temperature change of the polymer

material comprising the grating in this invention then produces a linear response of the resonant wavelength of the grating with respect to temperature, thus providing linear tunability. In addition, grating devices in this invention will have wide resonant wavelength tuning capability (bandwidth) because of enhanced thermo-optic coefficients.

5 The invention has now been explained with reference to specific embodiments. Other embodiments will be apparent to those of ordinary skill in the art. Therefore it is not intended that the invention be limited, except as indicated by the appended claims, which form part of the invention description.

WHAT IS CLAIMED IS:

1. A thermo-optic apparatus which is thermally cycled comprising:
a polymer having a glass transition temperature not exceeding a minimum
operating temperature of the polymer along an optical path such that the component
functions in a manner allowing polymer chains to retain high local mobility.
2. The apparatus according to claim 1 further including a thermal
excitation element thermally coupled to an optical transmission region of the component
for controllably effecting a change in refractive index in response to temperature change
during a period of interest.
3. The apparatus according to claim 2, wherein said excitation
element is a patterned resistive layer.
4. The apparatus according to claim 2 formed as a deflector.
5. The apparatus according to claim 4 wherein said deflector is a total
internal reflection switch.
6. The apparatus according to claim 2 formed as a controller capable
of regulating to a desired index of refraction.
7. The apparatus according to claim 6 wherein said controller is a
grating.
8. The apparatus according to claim 1 wherein said glass transition
temperature is at least 20 °C below a minimum operating temperature of said polymer.
9. The apparatus according to claim 1 further including a heating
element to maintain a minimum operating temperature.
10. The apparatus according to claim 1 further including a cooling
element to regulate the nominal operating temperature.
11. The apparatus according to claim 1 wherein said optical path is an
optical waveguide segment.

12. The apparatus according to claim 1 wherein said polymer is a crosslinked polymer.

13. The apparatus according to claim 1 wherein said polymer has an effective glass transition temperature not exceeding a minimum operating temperature of the polymer along an optical path such that the component functions in a manner allowing polymer chains to retain high local mobility.

14. The apparatus according to claim 1, wherein said polymer comprises at least one layer on a substrate.

15. An optical device comprising:

at least one element of an optically transparent polymer having a glass transition temperature and a temperature dependent excitation threshold for the appearance of viscoelastic effects;

5 a thermal exciter disposed proximate said polymer element for actuating said polymer element; and

a temperature control system for regulating the nominal operating temperature to a range around a design temperature, such that said operating temperature is maintained above said glass transition temperature, in order to exploit viscoelastic 10 effects at temperatures above said glass transition temperature.

16. The optical device according to claim 15 wherein said thermal exciter is operative to change the index of refraction of the optical element.

17. The optical device according to claim 16, wherein said change in index is cyclic.

18. The optical device according to claim 15 further including an optical waveguide optically coupled to said polymer element.

19. The optical device according to claim 15 further including electrodes forming a portion of said thermal exciter.

20. The optical device according to claim 15 wherein said polymer element is disposed in an optical path as an optical switch, said optical switch being responsive to said thermal exciter to change transmissive state.

21. The optical device according to claim 20 wherein said optical switch is a total internal reflection switch.

22. The optical device according to claim 15 wherein said polymer element is disposed in an optical path as a controller capable of regulating to a desired index of refraction.

23. The optical device according to claim 22 wherein said controller is a tunable optical grating responsive to said thermal exciter.

24. The optical device according to claim 15, wherein said glass transition temperature is at least 20° C below the polymer nominal operating temperature.

25. The optical device according to claim 15 further including a cooling element to regulate the nominal operating temperature.

26. The optical device according to claim 15, wherein the excitation threshold is a threshold of slow change of index of refraction in said polymer, said slow change in index of refraction having a rate of change which is less than a rate of change of thermal excitation applied by said thermal exciter.

27. The optical device according to claim 15, wherein said polymer is a crosslinked polymer.

28. The optical device according to claim 27, wherein the excitation threshold is a threshold of slow change of index of refraction in said crosslinked polymer and wherein said temperature control system is operative to maintain said nominal operating temperature such that the threshold relative to the thermal pulse energy per unit area is substantially greater than the thermal pulse energy per unit applied by said thermal exciter.

29. The optical device according to claim 27, wherein the excitation threshold is a threshold of slow change of index of refraction in said crosslinked polymer and wherein said temperature control system is operative to maintain said nominal operating temperature such that the threshold relative to the thermal power per unit area is substantially greater than the thermal power per unit applied by said thermal exciter.

30. The optical device according to claim 15, wherein said polymer has an effective glass transition temperature, and said temperature control system regulates the nominal operating temperature to a range around said design temperature, such that said operating temperature is maintained above said effective glass transition temperature, in order to exploit viscoelastic effects at temperatures above said effective glass transition temperature.

31. An optical device comprising:
at least one layer of an optically transparent polymer element characterized by a glass transition temperature below a nominal operating temperature of said optical device;
an optical waveguide disposed to include said polymer element; and
a temperature control system for regulating operating temperature such that said operating temperature is maintained above said glass transition temperature in order to exploit at least one property of said polymer at said nominal operating temperature.

32. The optical device according to claim 31 wherein said property is rate of change of index of refraction with temperature.

33. The optical device according to claim 31 wherein said property is reduction of power requirements required to excite said polymer element.

34. The optical device according to claim 33 wherein said property is reduction of thermal energy requirements required to excite said polymer element.

35. The optical device according to claim 31 wherein said property is fidelity of reproduction of a predicted response with minimum distortion, wherein said predicted response is in form of rate of change of index of refraction vs. time.

36. The optical device according to claim 31 wherein said property is minimized generation of additional frequency components of an output signal relative to a predicted signal, said output signal being a rate of change of index of refraction vs. time.

37. The optical device according to claim 31 wherein said property is reduced optical insertion loss of said element.

38. The optical device according to claim 31 wherein said property is increased lifetime including tolerance for thermal cycling.

39. The optical device according to claim 31 wherein said property is low residual stress associated with fabrication.

40. The optical device according to claim 31 wherein said property is low birefringence.

41. The optical device according to claim 31 wherein said property is the essentially constant rate of change of index of refraction as a function of temperature.

42. The optical device according to claim 31 wherein said device is an optical grating.

43. The optical device according to claim 42 wherein said property is the linear relationship between the resonant wavelength of said grating with respect to temperature.

44. The optical device according to claim 31 formed as an optical switch.

45. The optical device according to claim 31 further including an applicator electrode for thermally exciting a change of index of refraction of said element.

46. The optical device according to claim 31 wherein said polymer is a crosslinked polymer.

47. The optical device according to claim 46 wherein said property is reduced long-term physical deformation (creep) of said element.

48. The optical device according to claim 46 wherein said property is low residual stress associated with thermal cycling.

49. The optical device according to claim 31 wherein said polymer is a polyacrylate.

50. The optical device according to claim 15 wherein said polymer is a polyacrylate.

51. The optical device according to claim 1 wherein said polymer is a polyacrylate.

52. The optical device according to claim 31 wherein said polymer is a polyurethane.

53. The optical device according to claim 15 wherein said polymer is a polyurethane.

54. The optical device according to claim 1 wherein said polymer is a polyurethane.

55. An integrated optical switch comprising:
a substrate;
a waveguide disposed on the substrate, the waveguide having an output;
a polymeric element disposed on the substrate proximate to the output of
the waveguide to optically couple to the waveguide, the polymeric element being
optically transmissive and having a selected glass transition temperature; and
a heating element thermally coupled to the polymeric element to maintain
an operating temperature of the polymeric element above the selected glass transition
temperature.

56. The integrated optical switch according to claim 55 wherein said heating element is configured to further provide transient thermal energy to said polymeric element to alter an optical characteristic of said polymeric element and actuate said integrated optical switch.

57. The integrated optical switch according to claim 55 further comprising a second heating element thermally coupled to said polymeric element to provide transient thermal energy to said polymeric element to alter an optical characteristic of said polymeric element and actuate said integrated optical switch.

58. An optical device comprising:
- an input waveguide coupled to an input of the optical device, the input waveguide having a transmission axis;
- a first output waveguide optically coupled to the input waveguide and forming a first angle of separation with the transmission axis of the input waveguide, the first output waveguide including a section of polymer material having a selected glass transition temperature;
- 10 a second output waveguide optically coupled to the input waveguide and forming a second angle of separation with the transmission axis of the input waveguide so that light transmitted by the input waveguide is capable of being split between the first output waveguide and the second output waveguide; and
- a heater, thermally coupled to at least the first output waveguide, to maintain an operating temperature of the polymer material above the selected glass transition temperature.

59. The optical device according to claim 58 wherein the second output waveguide includes a second section of polymeric material having a second selected glass transition temperature and further comprising a second heater thermally coupled to the second output waveguide.

60. The optical device according to claim 58 wherein said first angle of separation is zero degrees and said first output waveguide is a continuation of said input waveguide.

61. A Total Internal Reflective (TIR) optical switch comprising:
a core of a first optical material, said core forming a primary waveguide;
at least one cladding layer of a second optical material, said cladding layer
disposed adjacent said core and having a lower index of refraction than said core;
5 at least one of said first and second optical materials being an optically
transmissive crosslinked polymer having a glass transition temperature;
a patterned resistive primary heating element disposed upon said cladding
layer and bridging said primary waveguide such that an edge of the electrode is at an
oblique angle to said waveguide, said electrode, when activated, being for effecting a
10 change of the index of refraction of said polymer for redirecting optical energy from said
primary waveguide, said element being coupleable to a controlling exciter, said optical
switch being for operation in an environment at a temperature above said glass transition
temperature.

62. The TIR optical switch according to claim 61 further including a
secondary heating element for maintaining said environment at a temperature above said
first and second glass transition temperature.

63. The TIR optical switch according to claim 61 wherein said primary
heating element is additionally operative to maintain said environment at a temperature
above said first and second glass transition temperature.

64. A method for operating an optical device comprising an optical
structure fabricated from an optically transmissive polymer material characterized by a
glass transition temperature and a temperature dependent threshold for appearance of
viscoelastic effects, said method comprising:

- 5 maintaining an operating temperature above the glass transition
temperature; while
directing optical energy into said polymer element; while
selectively applying thermal energy to said polymer element to selectively
control the transport of said optical energy.

65. The method according to claim 64 wherein said selectively
applying step comprises:

selectively applying impulses of thermal energy to a selected region of said polymer element to effect a localized change of index of refraction at a controlled rate of change.

66. The method according to claim 65 further including the step of thereafter:

allowing said index of refraction to substantially revert; and thereafter selectively reapplying thermal energy to said polymer element to re-effect
5 a change of index of refraction at a controlled rate of change.

67. The method according to claim 66 further including, after applying said thermal energy, actively extracting heat from said polymer element.

68. A method for using a polymer material comprising:
establishing a minimum operating temperature above a characteristic glass transition temperature of the polymer; thereafter;
transiently thermally exciting the polymer above the minimum operating
5 temperature while directing electromagnetic energy into the polymer to effect a change of the index of refraction of the polymer in order to control the transport of the electromagnetic energy.

69. A method for operating an optical switch having a core of optically transmissive crosslinked polymer having a first glass transition temperature, at least one cladding layer of optically transmissive crosslinked polymer having a second glass transition temperature, and an applicator electrode for effecting a change of the index of refraction of said polymer, said applicator electrode being coupled to an exciter, said optical switch being for operation in an environment at a temperature above said second glass transition temperatures, said method comprising:
maintaining an operating temperature above the glass transition temperature; while
10 directing optical energy into said core; while selectively applying thermal energy to a region of said core through said applicator electrode to change index of refraction in said region in order to selectively redirect said optical energy.

70. A method for operating an optical switch having a core of optically transmissive crosslinked polymer having a first glass transition temperature, at least one cladding layer of optically transmissive crosslinked polymer having a second glass transition temperature, and an applicator electrode for effecting a change of the index of refraction of said polymer, said applicator electrode being coupleable to an exciter, said optical switch being for operation in an environment at a temperature above said first and second glass transition temperatures, said method comprising: maintaining an operating temperature above the glass transition temperature; while
- 5 directing optical energy into said core; while
- 10 selectively applying thermal energy to a region of said core through said applicator electrode to change index of refraction in said region in order to selectively redirect said optical energy.

1/8

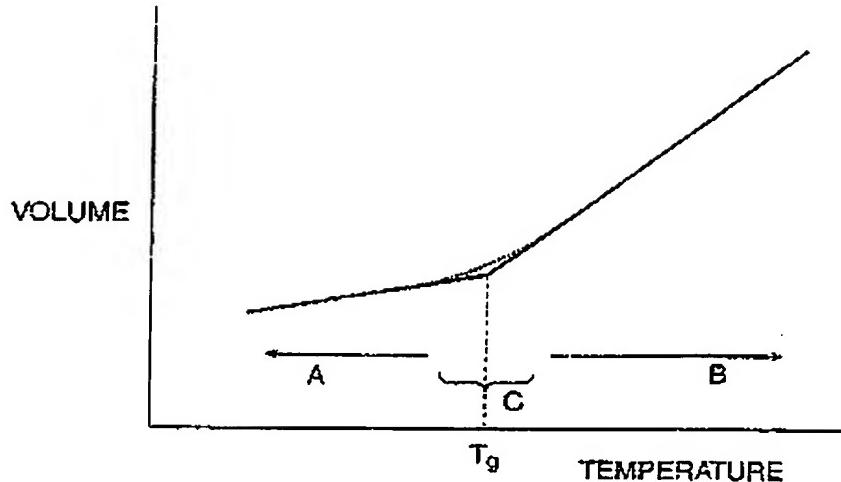


FIG. 1

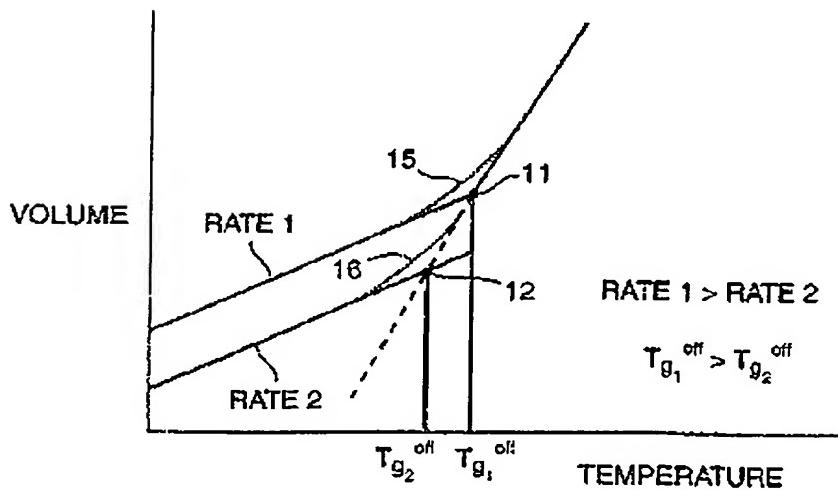


FIG. 2

2/8

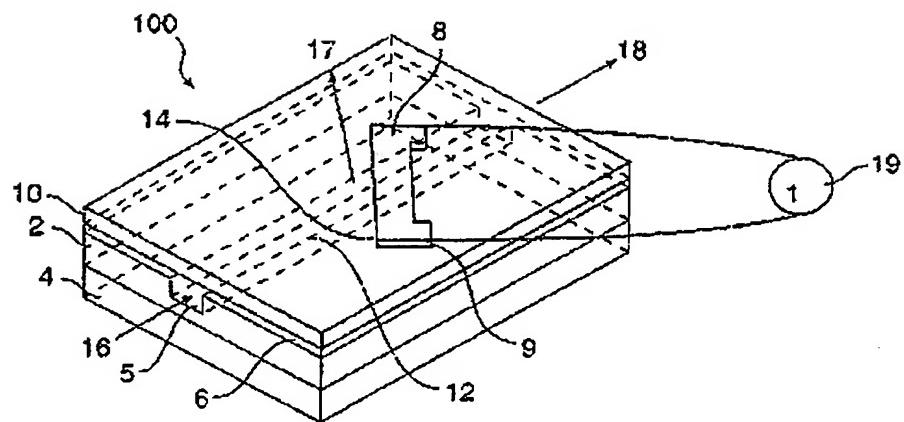


FIG. 3

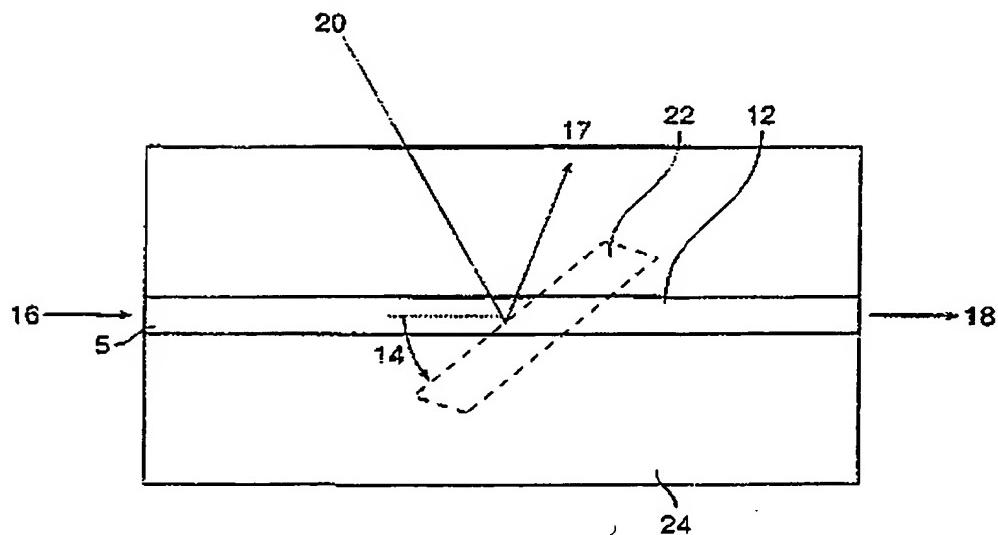


FIG. 4

3/8

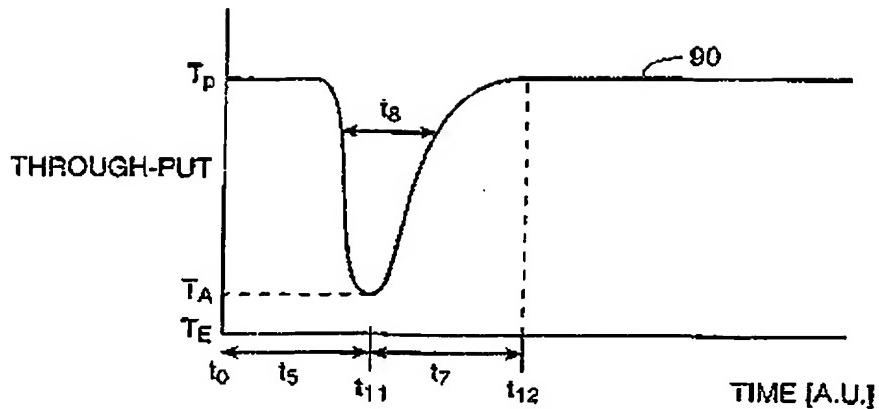


FIG. 5A

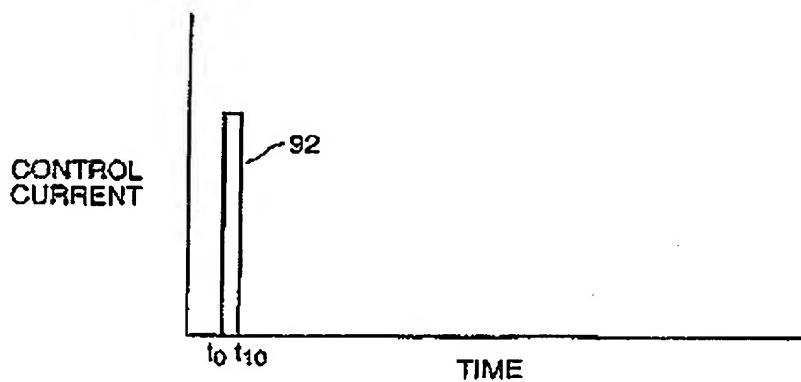


FIG. 5B

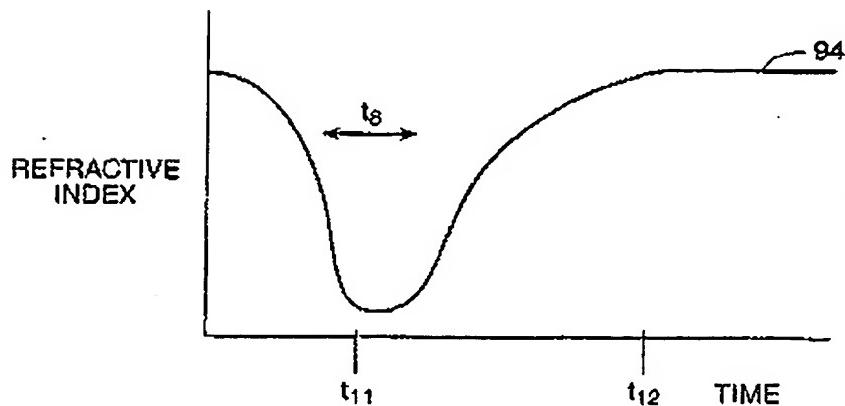


FIG. 5C

4/8

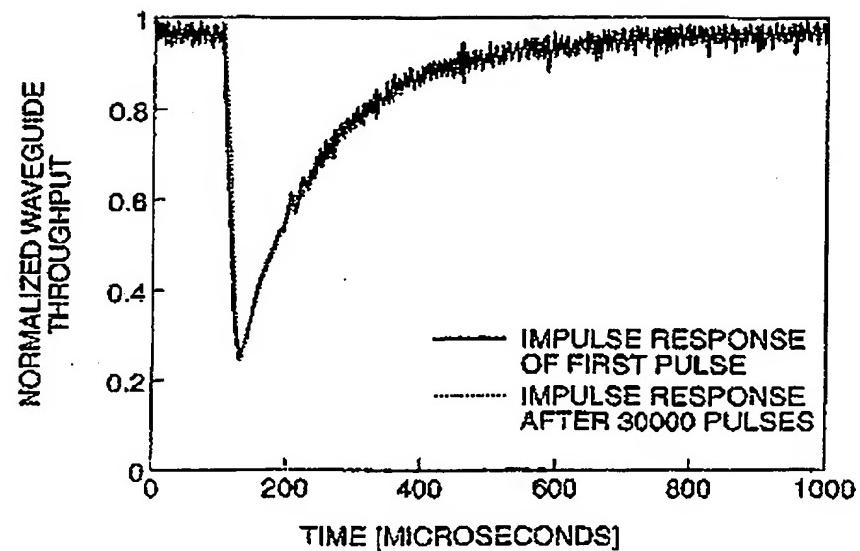


FIG. 6
(PRIOR ART)

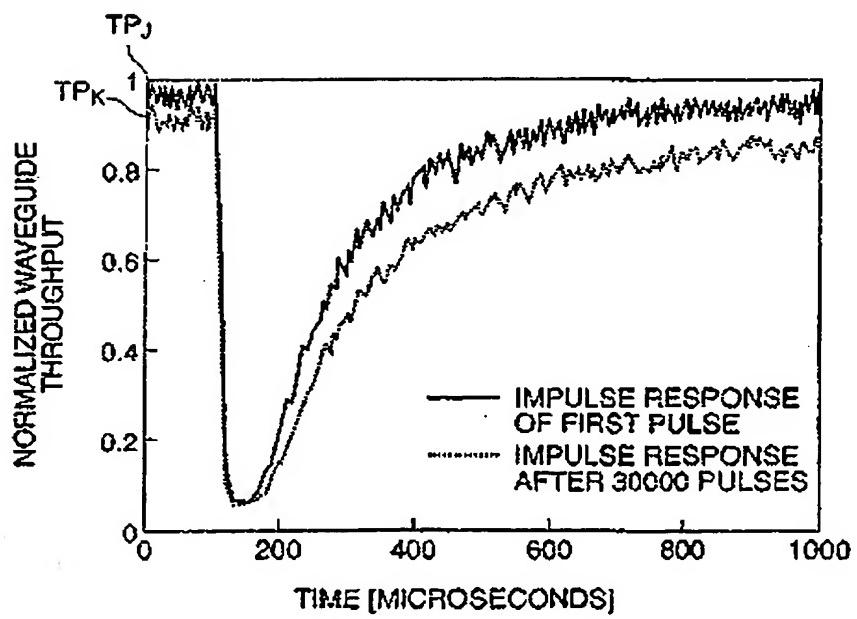


FIG. 7
(PRIOR ART)

5/8

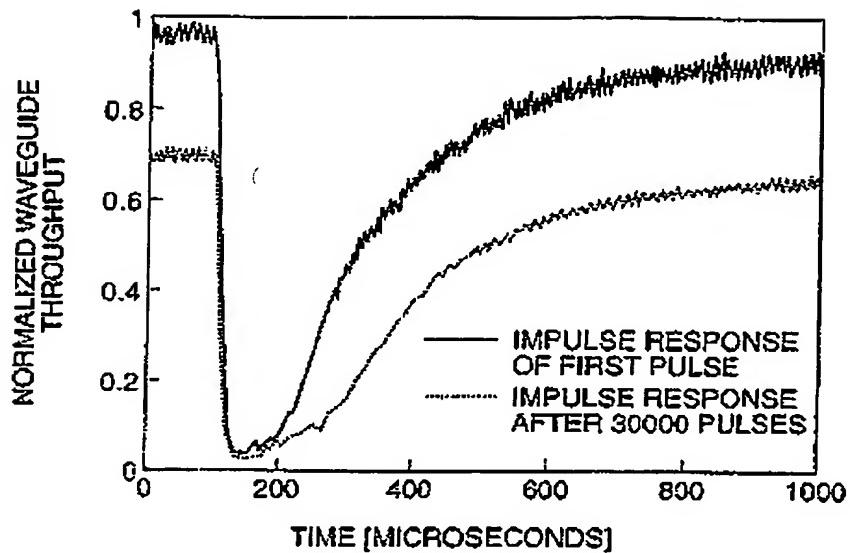


FIG. 8
(PRIOR ART)

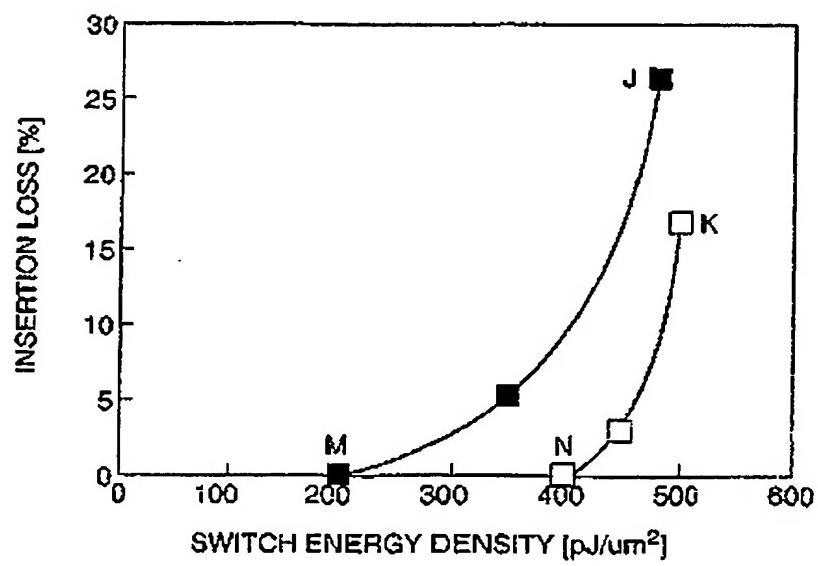


FIG. 9

6/8

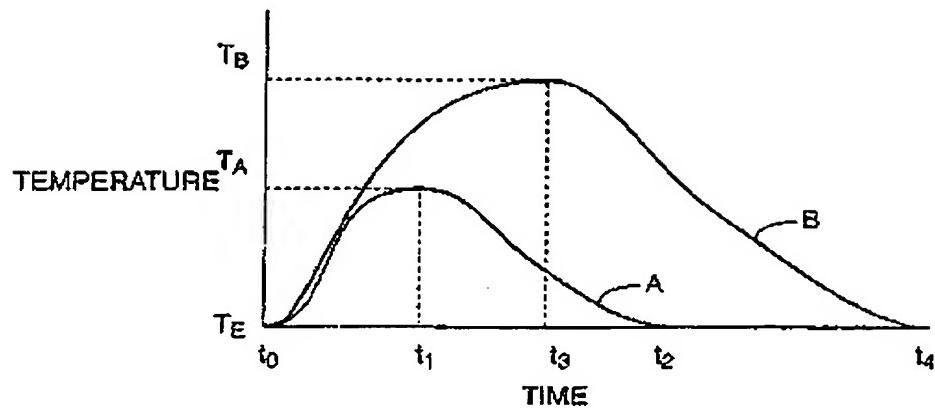


FIG. 10

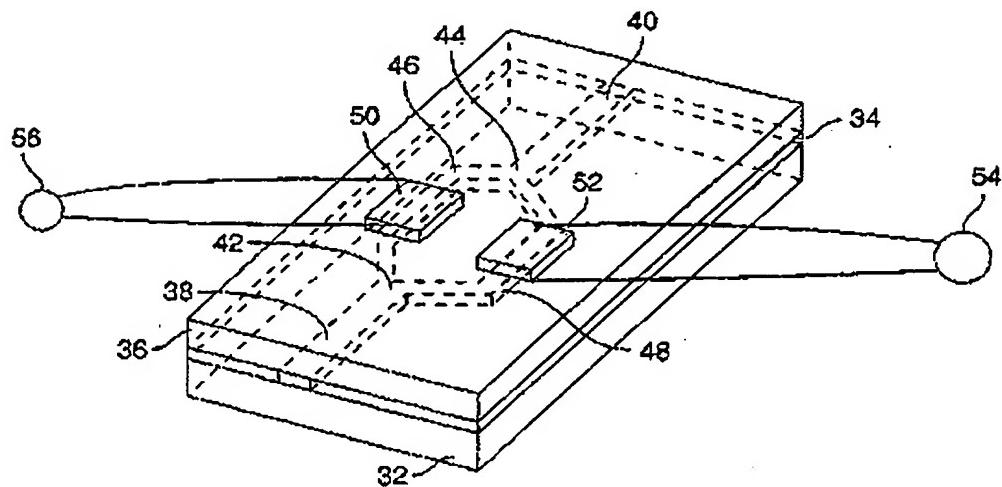


FIG. 11

7/8

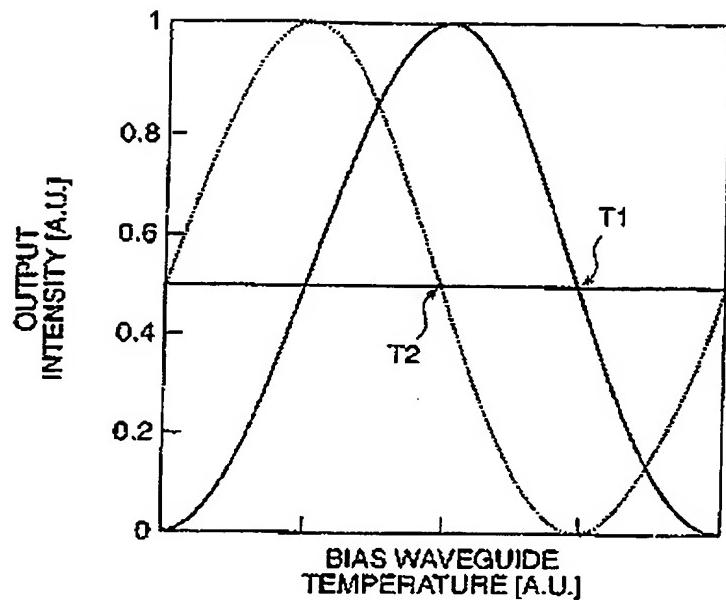


FIG. 12

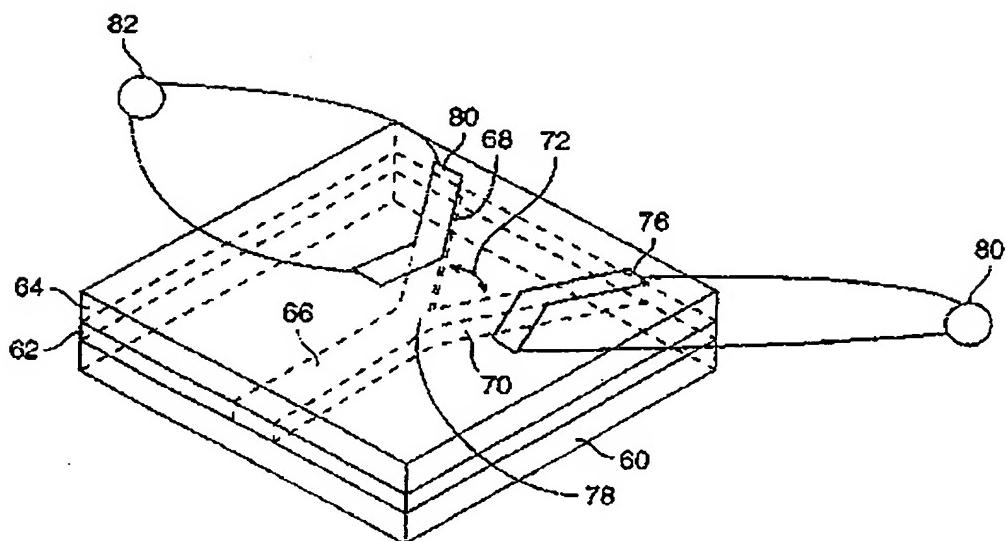


FIG. 13

8/8

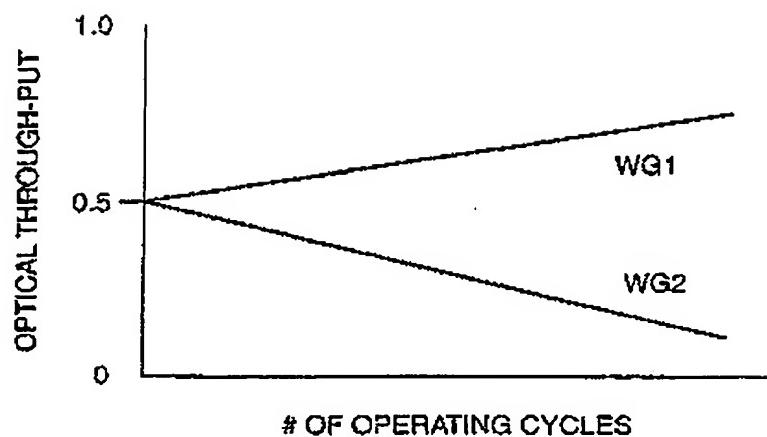


FIG. 14

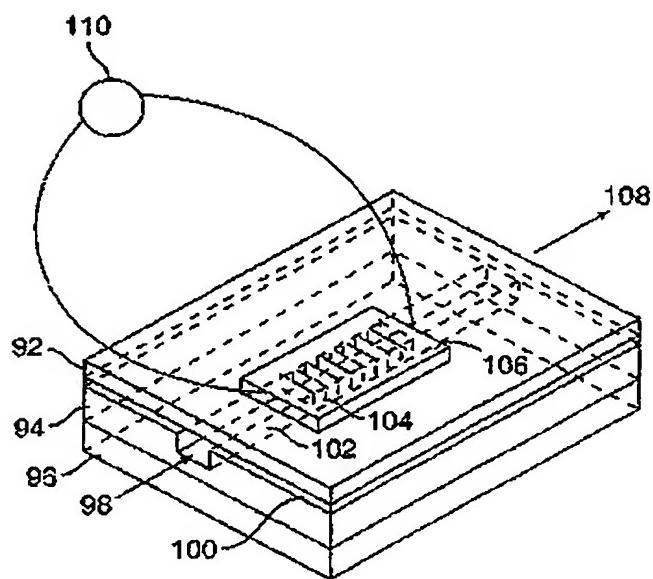


FIG. 15

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/USA98/07630

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC(7) : G02B 06/12

US CL : 385/14, 122, 16, 37

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

U.S. : 385/122, 1, 4, 37, 16, 141, 142, 143, 144, 145, 129, 132, 14

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
None

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
East (BRS). Search terms: waveguide, polymer, heating, and switch.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|---|
| X | DIEMEER ET AL. Polymer Optical Waveguide Switch Using the Thermooptic Effect. Journal Of Lightwave Technology, Vol. 7, No.3. March 1989. Pages 449-453 | 1-6, 9, 11-16, 19-22, 27, 30-35, 37, 39-41, 44-54, 64 and 68-70 |
| A | MOOSBURGER ET AL. A Novel Polymer Digital Optical Switch with High Temperature Stability. Pro. 21 Eur. Conf. Opt. Comm. (ECOC'95)-Brussels. Pages 1063-1066. 1995. See entire document. | 1-70 |
| A | WU ET AL. Electrooptic Cardo-type Polymers with High Glass Transition Temperature. American Chemical Society Symposium Series 601. Pages 356-367. 1995. See entire document. | 1-70 |

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

| | |
|--|--|
| Special categories of cited documents: | |
| "A" | document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance |
| "B" | earlier document published on or after the international filing date |
| "C" | document which may throw doubts on priority claim(s), or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) |
| "D" | document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means |
| "E" | document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed |
| "F" | later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention |
| "G" | document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone |
| "H" | document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| "I" | document member of the same patent family |

Date of the actual completion of the international search

02 JUNE 2000

Date of mailing of the international search report

13 JUN 2000

Name and mailing address of the ISA/US
Commissioner of Patents and Trademarks
Box PCT
Washington, D.C. 20231

Facsimile No. (703) 305-3230

Authorized officer

HUNG NGO

Telephone No. (703) 308-0297

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US00/07630

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|--|-----------------------|
| A | NAHATA ET AL. Thermal stable Polyester Polymers for Second-Order Nonlinear Optics. <i>Applied Physics Letters</i> ^4(25). Pages 3371-3373. June 1994. See entire document. | 1-70 |
| A | US 6,047,098 A (SAGAWA ET AL) 04 APRIL 2000 (04/04/2000), see entire document. | 1-70 |

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.